



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
Curso de Engenharia Civil
Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas

ANÁLISE DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO: FLAMBAGEM E RESISTÊNCIA

ELIANE SOUZA DOS SANTOS

Projeto de Final de Curso apresentado ao corpo docente do Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

Eduardo de Miranda Batista

Prof^o. Associado, D.Sc., Escola Politécnica/UFRJ(Orientador)

Michèle Schubert Pfeil

Prof^a. Associada, D.Sc., Escola Politécnica/UFRJ

Elaine Garrido Vazquez

Prof^a. Adjunta, D.Sc., Escola Politécnica/UFRJ

Dezembro de 2007

Agradecimentos

A Deus.

A minha família.

A Escola Politécnica - UFRJ.

A COPPE.

A Engesystems - Sistemas de Armazenagens Ltda.

Resumo

Este Projeto Final de Curso apresenta os resultados de um estudo teórico-experimental sobre flambagem e resistência de perfis de aço formados a frio (PFF), submetidos à compressão e à flexão, com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural de casos não previstos pela norma NBR 14762:2001[1]. Além disso, é estudada a redução da resistência à compressão devido à presença de furos ao longo do seu comprimento.

Os estudos se dirigem a estruturas de aço formadas por PFF do tipo estantes porta-pallet, de grande emprego na área de logística dirigida à indústria e ao comércio.

Primeiramente foi desenvolvido o cálculo de resistência, segundo o Método da Resistência Direta, de acordo com as prescrições da norma americana *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* - AISI [2]. Os modos de flambagem local de placa, distorcional e global por flexo-torção e por flambagem lateral com torção foram analisados com auxílio de cálculo numérico - método das faixas finitas - e por análise experimental. Os resultados experimentais obtidos dos ensaios foram utilizados para aferir os modos de flambagem e de colapso estrutural, auxiliando na compreensão do comportamento das barras sob compressão simples e sob flexão, respectivamente, montantes e longarinas do sistema estrutural.

O presente trabalho é resultado de parte de uma pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ para a empresa Engesytems - Sistemas de Armazenagens Ltda. A descrição e os resultados completos da referida pesquisa estão incluídos no Relatório COPPETEC DEC-8865 [3], de novembro de 2007.

Índice

AGRADECIMENTOS	2
RESUMO	3
ÍNDICE	4
INTRODUÇÃO	6
MEMÓRIA DE CÁLCULO	8
PARTE I - ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE LONGARINAS	8
1 - ABORDAGEM TEÓRICA	8
1.1 - Seção aberta - EL 115 C 1,50 mm	8
1.1.1 - Carregamento e Esforços Solicitantes.....	8
1.1.2 - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2].....	14
1.1.3 - Cálculo do valor de cada força concentrada máxima que pode ser aplicada neste tipo de longarina considerando o momento máximo resistente	18
1.1.4 - Verificação de Esmagamento de Alma (conforme Anexo E da NBR 14762:2001 [1])	19
1.2 - Seção fechada - EL 115 O 1,50 mm	21
1.2.1 - Carregamento e Esforços Solicitantes.....	21
1.2.2 - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2].....	26
1.2.3 - Cálculo do valor de cada força concentrada máxima que pode ser aplicada neste tipo de longarina considerando o momento máximo resistente	30
1.2.4 - Verificação de Esmagamento de Alma (conforme Anexo E da NBR 14762:2001[1]).....	30
2 - ABORDAGEM EXPERIMENTAL	33
2.1 - Ensaio da longarina EL 115 C 1,50 mm	33
2.2 - Ensaio da longarina EL 115 O 1,50 mm	39
3 - COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS ABORDAGENS TEÓRICA E EXPERIMENTAL PARA A ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DAS LONGARINAS	46
3.1 - Longarina EL 115 C 1,50 mm.....	46
3.2 - Longarina EL 115 O 1,50 mm	47
PARTE II - ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE MONTANTES	48
1 - ABORDAGEM TEÓRICA	48
1.1 - Montante EM 80 - 2,00 mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2].....	48
1.1.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001 [1]): P _{cr}	50
1.1.2 - Carga para início da plastificação da seção: P _y	51
1.1.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P _{cr1}	51
1.1.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P _{crd}	51
1.1.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI [2]): P _{ne}	51
1.1.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: P _{nl}	52
1.1.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: N _{nd}	52
1.1.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal	52
1.1.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo.....	52
1.2 - Montante EM 80 - 2,65 mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2].....	53
1.2.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001[1]): P _{cr}	55
1.2.2 - Carga para início da plastificação da seção: P _y	56
1.2.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P _{cr1}	56
1.2.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P _{crd}	56
1.2.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI[2]): P _{ne}	56
1.2.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: P _{nl}	57
1.2.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: N _{nd}	57
1.2.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal	57
1.2.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo.....	57
1.3 - Montante EM 100 - 2,00 mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]... ..	58
1.3.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001 [1]): P _{cr}	60
1.3.2 - Carga para início da plastificação da seção: P _y	61
1.3.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P _{cr1}	61
1.3.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P _{crd}	61
1.3.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI [2]): P _{ne}	61
1.3.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: P _{nl}	62
1.3.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: N _{nd}	62

1.3.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal	62
1.3.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo	62
1.4 - Montante EM 100 - 2,65mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]	63
1.4.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001 [1]): P_{cre}	65
1.4.2 - Carga para início da plastificação da seção: P_y	66
1.4.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P_{cr1}	66
1.4.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P_{crd}	66
1.4.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI [2]): P_{ne}	66
1.4.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: P_{nl}	67
1.4.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: P_{nd}	67
1.4.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal	67
1.4.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo	67
2 - ABORDAGEM EXPERIMENTAL	68
2.1 - Ensaio dos Montantes EM 100 - 2,00 mm	70
2.2 - Ensaio dos Montantes EM 100 - 2,65 mm	70
2.3 - Ensaio dos Montantes EM 80 - 2,00 mm	71
2.4 - Ensaio dos Montantes EM 80 - 2,65 mm	72
3 - COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS ABORDAGENS TEÓRICA E EXPERIMENTAL	
PARA A ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DOS MONTANTES	73
3.1 - Resultados do ensaio de caracterização do aço	73
3.2 - Flambagem e resistência dos montantes	74
3.3 - Influência dos furos	75
CONCLUSÕES	78
ANEXO I - ENSAIOS DAS LONGARINAS	79
ANEXO II - ANÁLISE DAS LONGARINAS NO PROGRAMA CUFISM V3.12	83
ANEXO III - ANÁLISE DOS MONTANTES NO PROGRAMA CUFISM V2.6	93
REFERÊNCIAS	109

Introdução

Os perfis formados a frio (PFF) são obtidos a partir de dobragem a frio (em temperatura ambiente) de chapas de 4 mm até 8 mm, limites estes estabelecidos pela Norma NBR 14762:2001 [1]. Os perfis formados a frio são amplamente utilizados em estruturas leves de aço. Esse tipo de material vem ganhando espaço pelas vantagens que oferece sobre os perfis laminados. Podemos citar algumas delas: (i) os PFF têm forma e dimensões que se adequam à solicitação, representando economia; (ii) os PFF apresentam facilidades de produção agregada a custo menor se comparada a de um perfil laminado; (iii) para cargas e vãos médios uma estrutura com PFF resulta mais leve [4].

Em relação ao aspecto estrutural, os perfis de aço formados a frio apresentam maior esbelte local (relação largura-espessura dos elementos) do que os perfis laminados, acentuando a flambagem local. Além disso, em se tratando de seções abertas com paredes muito delgadas, a rigidez à torção diminui, o que torna os modos globais de torção e flexo-torção muitas vezes dominantes em relação aos modos de flexão. Outro modo de flambagem que pode se manifestar é o modo distorcional, característico nos perfis com enrijecedores de borda.

Com relação à verificação da flambagem de perfis formados a frio têm-se adotado procedimentos de cálculo prescritos pela NBR 14762:2001 [1], que são baseados no conceito de largura efetiva. Esse método apresenta, porém, algumas desvantagens: (i) a determinação da seção efetiva é trabalhosa quando é formada por vários elementos e/ou enrijecedores intermediários, sobretudo no caso de perfis esbeltos submetidos à flexão, pois há necessidade de se realizar cálculos iterativos; (ii) dificuldade de incluir no cálculo o modo de flambagem distorcional (algumas normas de cálculo contornam o problema limitando as dimensões e os tipos de perfis que podem ser utilizados) [4].

No presente trabalho, os perfis serão analisados pelo Método da Resistência Direta, que é uma alternativa ao Método da Largura Efetiva na determinação da resistência de perfis formados a frio, submetidos à compressão ou à flexão. Esse método consiste, basicamente, em utilizar curvas de resistência ajustadas experimentalmente para calcular as cargas de colapso a partir da carga de flambagem elástica da seção completa e não dos elementos isolados. O método da resistência direta apresenta várias vantagens: (i) no cálculo da resistência não há necessidade da determinação de propriedades geométricas efetivas; (ii) os cálculos não precisam ser feitos para elementos individualmente (analogia de placas); (iii) não há cálculos iterativos; (iv) no cálculo da resistência se utilizam as propriedades geométricas da seção bruta; (v) a flambagem distorcional é explicitamente tratada no projeto como um modo de colapso único; (vi) proporciona um procedimento de projeto mais abrangente e flexível; (vii) é aplicável a um grupo maior de geometria de seções transversais, nas mais variadas formas, no qual os procedimentos das normas vigentes não são aplicáveis; (ix) permite e estimula a otimização de seções transversais [4].

O uso de Método da Resistência Direta requer: (i) a determinação das cargas críticas de flambagem elástica do perfil completo e (ii) a aplicação dessa informação junto a uma série de curvas de resistência, determinando assim a resistência última do perfil. Para a determinação da carga crítica de flambagem elástica local e distorcional é utilizado o Método das Faixas Finitas, com auxílio do programa computacional CU-FSM [5], Shafer¹. Esse programa

¹ Shafer e Peköz propuseram o Método da Resistência Direta. Shafer desenvolveu o programa computacional baseado no Método das Faixas Finitas (Cheung), o qual denominou de CUFSM – Finite Strip Method – Cornell University.

permite fazer análise da flambagem elástica de perfis de parede fina de seção aberta, submetidas a qualquer distribuição de tensões normais, sendo importante ressaltar que ao longo do comprimento não pode haver aplicação de carregamentos, variação da seção e das condições de contorno (condições fundamentais ao método das faixas finitas).

O cálculo da resistência desses perfis seguirá a norma americana *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* - AISI [2].

Essa norma faz algumas restrições quanto à geometria das seções e o material da barra a ser analisada, pois as expressões de cálculo se aplicam sem erros relevantes àqueles perfis de parede fina testados experimentalmente. Este não é o caso dos perfis aqui analisados, sendo, portanto, necessária a análise experimental para comprovação dos resultados encontrados nos cálculos teóricos de resistência.

As longarinas e montantes estudados fazem parte de sistemas estruturais para estocagem de produtos, do tipo porta-pallet, conforme apresentado na figura 1. Dada a geometria não usual das seções das longarinas e a presença de furação padronizada nos montantes do tipo rack, torna-se obrigatória a verificação experimental da resistência de ambos os elementos, conforme previsto na Norma Brasileira NBR 14762:2001 [1].

O objetivo deste Projeto Final de Curso é, portanto, avaliar teórica e experimentalmente o desempenho estrutural dos perfis formados a frio, submetidos à compressão e à flexão. Para isso, foram tomados como exemplos: uma longarina de seção aberta e outra de seção fechada para análise de resistência à flexão simples; e quatro tipos de montantes para análise de resistência à compressão. Além disso, foi estudado para os montantes a redução da resistência à compressão devido à presença de furos ao longo do seu comprimento. Essas peças foram submetidas a ensaios experimentais, cujos resultados auxiliaram na aferição dos resultados teóricos, chegando assim às conclusões finais.

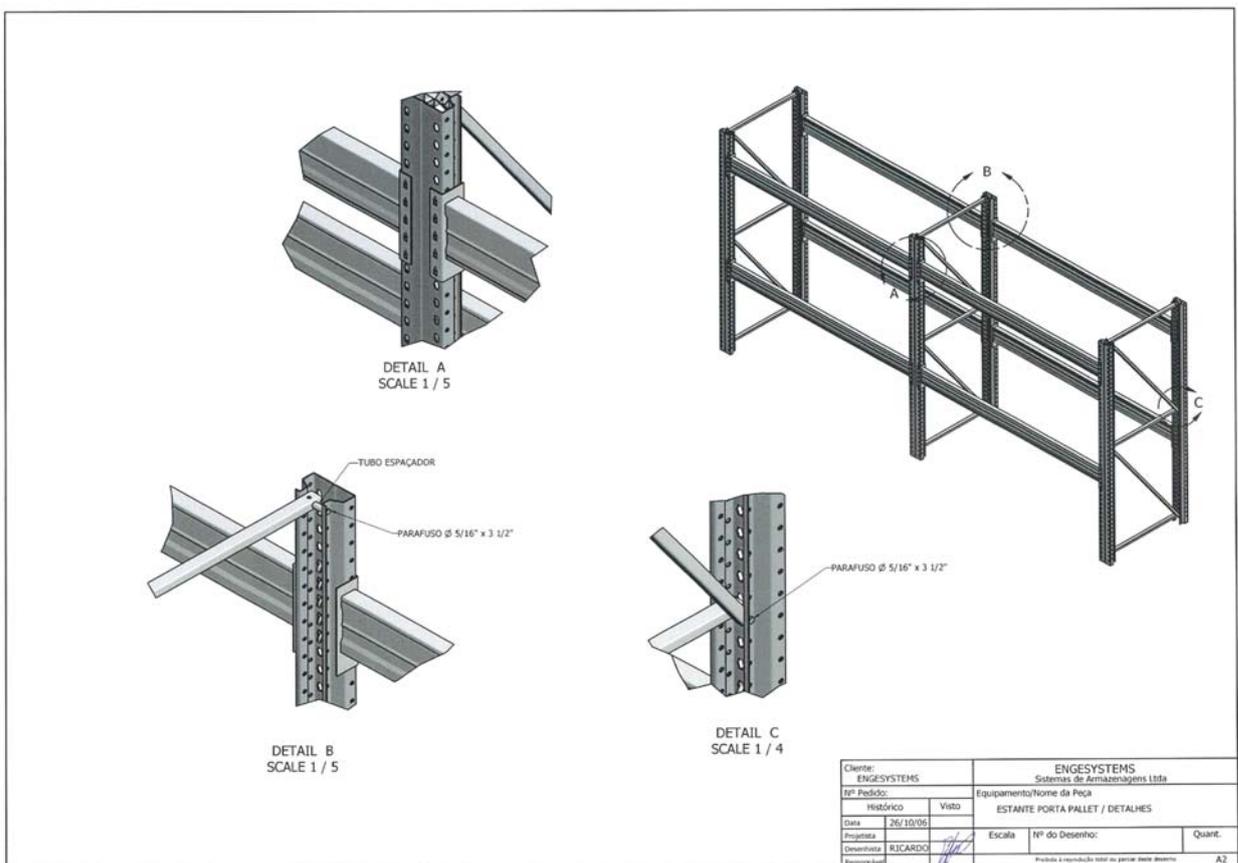


Figura 1-Sistema de estocagem tipo porta-pallet em estrutura de perfis de aço formados a frio.

Memória de Cálculo

PARTE I - Análise de Resistência de Longarinas

1 - Abordagem Teórica

1.1 - Seção aberta - EL 115 C 1,50 mm

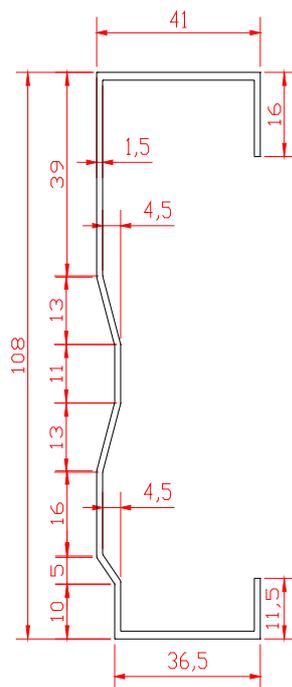


Figura 2 - Seção transversal da longarina EL 115 C 1,50 mm. Dimensões em mm.

1.1.1 - Carregamento e Esforços Solicitantes

O carregamento transversal (quatro cargas concentradas) na longarina é originado por pallets posicionados conforme apresentado na figura 3.

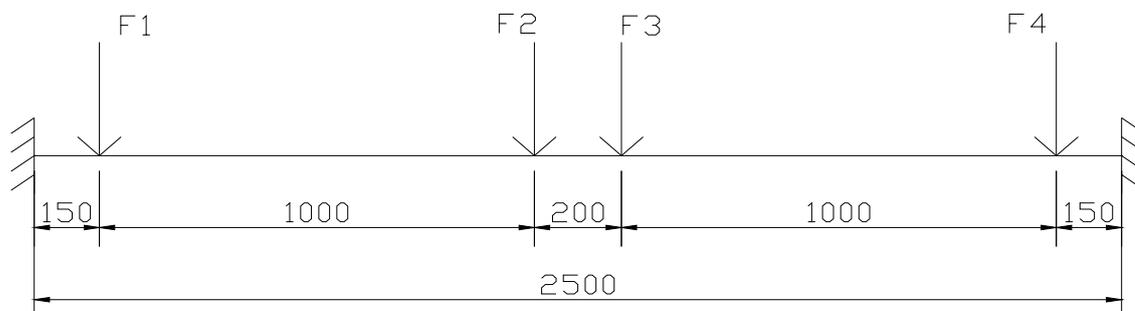


Figura 3 - Posicionamento dos pallets. Dimensões em mm.

Sabe-se que o momento nas extremidades de uma viga biengastada tem seu valor tabelado para uma carga concentrada. Por se tratar de regime linear elástico, o cálculo do momento de engastamento para o caso de quatro cargas concentradas, será executado a partir do princípio da superposição de efeitos.

Obs.: O peso próprio da longarina é desprezível se comparado ao carregamento aplicado e por isso, será desconsiderado nos cálculos.

I - Carregamento inicial - devido às vigas de montagem (ver Foto 1, pg. 31)

Perfil de aço (montagem): $h = 203.2$ mm; $mesa = 101.6$ mm; $alma = 7,94$ mm.

Massa das vigas de aço (montagem): $m = 0,0273$ kg/mm.

Comprimento das vigas de aço (montagem): $c1 = 1702$ mm; $c2 = 1705$ mm; $c3 = 1703$ mm; $c4 = 1687$ mm; $c5 = 1208$ mm; $c6 = 1230$ mm.

$$P_1 := \frac{(c1 \cdot m)}{2} + \frac{(c5 \cdot m)}{4}$$

$$P_1 = 31.477 \text{ N}$$

$$P_2 := \frac{(c2 \cdot m)}{2} + \frac{(c5 \cdot m)}{4}$$

$$P_2 = 31.518 \text{ N}$$

$$P_3 := \frac{(c3 \cdot m)}{2} + \frac{(c6 \cdot m)}{4}$$

$$P_3 = 31.641 \text{ N}$$

$$P_4 := \frac{(c4 \cdot m)}{2} + \frac{(c6 \cdot m)}{4}$$

$$P_4 = 31.422 \text{ N}$$

II - Acréscimo de carregamento

Dos ensaios (conforme ANEXO I), temos:

Carga máxima = 11.06 kN

Carga máxima dos pallets

$$f := \frac{11.06 \times 10^3}{8}$$

8

$$f = 1.383 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_1 := P_1 + f$$

$$F_2 := P_2 + f$$

$$F_3 := P_3 + f$$

$$F_4 := P_4 + f$$

Comprimento da longarina

$$L := 2500 \text{ mm}$$

III - Reações de apoio e esforços solicitantes ao longo da longarina para carregamento total, conforme Figura 4.

$$n := 4$$

$$a_1 := 150 \text{ mm}$$

$$a_2 := 1150 \text{ mm}$$

$$a_3 := 1350 \text{ mm}$$

$$a_4 := 2350 \text{ mm}$$

$$b_1 := 2350 \text{ mm}$$

$$b_2 := 1350 \text{ mm}$$

$$b_3 := 1150 \text{ mm}$$

$$b_4 := 150 \text{ mm}$$

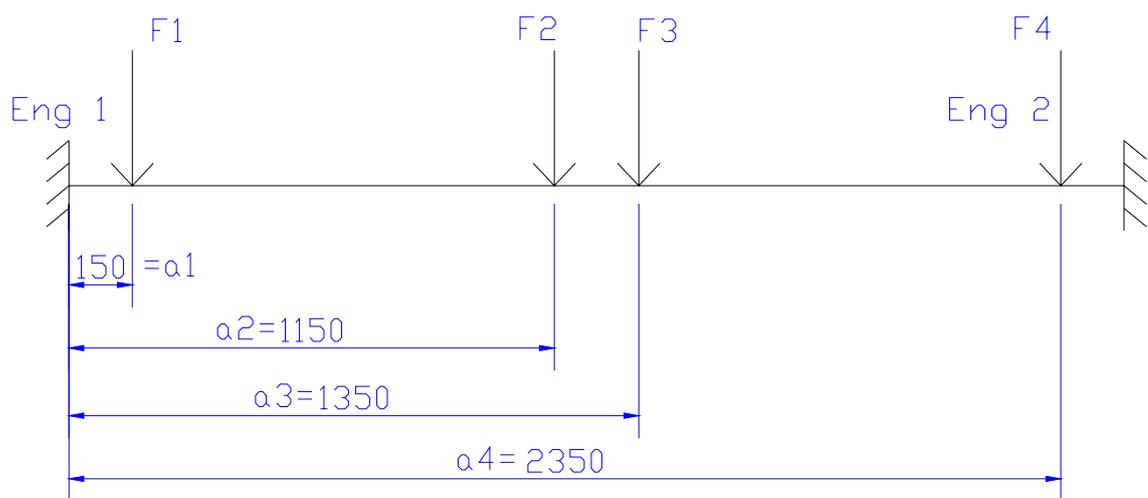


Figura 4 - Cálculo das reações de apoio e esforços solicitantes. Dimensões em mm.

III.1- Momento Fletor

$$\text{Meng1} := \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot a_i \cdot (b_i)^2}{L^2}$$

$$\text{Meng1} = 1.078 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\text{Meng2} := \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot (a_i)^2 \cdot b_i}{L^2}$$

$$\text{Meng2} = 1.078 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

III.2 - Cortante

$$\text{Veng1} := \frac{\text{Meng1} - \text{Meng2}}{L} + \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot b_i}{L}$$

$$\text{Veng1} = 2.829 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\text{Veng2} := \sum_{i=1}^n F_i - \text{Veng1}$$

$$\text{Veng2} = 2.829 \times 10^3 \text{ N}$$

III.3- Esforços solicitantes ao longo da longarina

III.3.1 - Momento fletor em função de x

$$M(x) := -\text{Meng1} + \text{Veng1} \cdot x - \sum_{i=1}^n F_i \cdot (x - a_i)$$

para qualquer a_i menor ou igual a x

III.3.2 - Cortante em função de x

$$V(x) := \text{Veng1} - \sum_{i=1}^n F_i$$

para qualquer a_i menor ou igual a x

**Tabela 1 - Esforços Solicitantes para longarina EL 115 C 1,50 mm em função de x
(comprimento = 2500 mm)**

x(mm)	M(x) (N.mm)	V(x) (N)
0	-1077514,3	2828056,7
100	-794708,6	2828056,7
200	-582602,0	1414076,7
300	-441194,3	1414076,7
400	-299786,6	1414076,7
500	-158379,0	1414076,7
600	-16971,3	1414076,7
625	18380,6	1414076,7
700	124436,4	1414076,7
800	265844,0	1414076,7
900	407251,7	1414076,7
1000	548659,4	1414076,7
1100	690067,1	1414076,7
1200	760773,7	56,7
1250	760776,6	56,7
1300	760779,4	56,7
1400	690077,6	-1414093,3
1500	548668,2	-1414093,3
1600	407258,9	-1414093,3
1700	265849,6	-1414093,3
1800	124440,2	-1414093,3
1875	18383,2	-1414093,3
1900	-16969,1	-1414093,3
2000	-158378,4	-1414093,3
2100	-299787,7	-1414093,3
2200	-441197,1	-1414093,3
2300	-582606,4	-1414093,3
2400	-794712,2	-2828023,3
2500	-1077514,6	-2828023,3

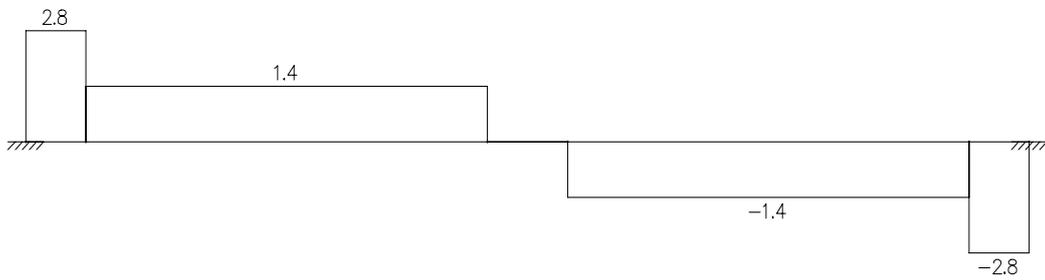


Figura 5 - Diagrama de Esforço Cortante - DEC (kN). Fonte: FTOOL

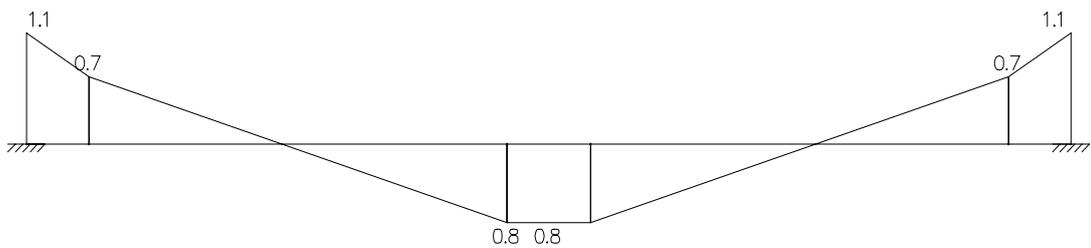


Figura 6 - Diagrama de Momento Fletor - DMF (kNm). Fonte: FTOOL

1.1.2 - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]

I - Propriedades do material

Aço SAE 1008

$E = 205000 \text{ MPa}$

$G = 78000 \text{ MPa}$

$f_y = 180 \text{ MPa}$ - no caso de aços sem qualificação estrutural, conforme item 4.2 da NBR 14762:2001 [1], não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento.

II - Parâmetros referentes às condições de contorno da longarina

II.1 - Parâmetros de flambagem na flexão para ambas extremidades com rotação impedida - k recomendado, conforme Anexo H da NBR 8800:2003 [6]

$$K_y := 0.65$$

$$K_x := 0.65$$

II.2 - Parâmetro de flambagem na torção para ambas extremidades com rotação e empenamento impedidos

$$K_t := 0.5$$

III - Propriedades geométricas da seção bruta (extraídas do programa CUFSM, conforme ANEXO II.1.2)

$$L := 2500 \text{ mm}$$

$$A_g := 312.3607 \text{ mm}^2$$

$$I_x := 547148.1324 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 67807.5291 \text{ mm}^4$$

$$I_t := 234.2705 \text{ mm}^4$$

$$x_{cg} := 12.915 \text{ mm}$$

$$y_{cg} := 54.6646 \text{ mm}$$

$$X_s := -16.4001 \text{ mm}$$

$$Y_s := 61.7 \text{ mm}$$

$$C_w := 160775671.3931 \text{ mm}^6$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$x_o := x_{cg} - X_s$$

$$y_o := y_{cg} - Y_s$$

$$r_x = 41.853 \text{ mm}$$

$$r_y = 14.734 \text{ mm}$$

$$x_o = 29.315 \text{ mm}$$

$$y_o = -7.035 \text{ mm}$$

$$r_o := \sqrt{(r_x^2) + (r_y^2) + (x_o^2) + (y_o^2)}$$

$$r_o = 53.643 \text{ mm}$$

1.1.2.1 - Cálculo do momento fletor de flambagem elástica lateral com torção² (conforme item 7.8.1.2 da NBR 14762:2001 [1]): M_{cre}

I - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y: P_{ey}

$$P_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2}$$

$$P_{ey} = 5.195 \times 10^4 \text{ N}$$

II - Força normal de flambagem elástica por torção: P_{et}

$$P_{et} := \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L)^2} + G \cdot I_t \right]$$

$$P_{et} = 7.87 \times 10^4 \text{ N}$$

² A expressão para o cálculo do momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, foi deduzida para carregamento aplicado na posição do centro de torção. O que não é o caso deste projeto. Porém, para efeito de aproximação será usada a mesma expressão.

III - Coeficiente de equivalência de momento na flexão

$$C_b = (12,5M_{max}) / (2,5M_{max} + 3M_a + 4M_b + 3M_c)$$

M_{max} é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado

M_a é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º quarto do trecho analisado

M_b é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado

M_c é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º quarto do trecho analisado

$$M_{max} := 1077514.567 \text{ N.mm}$$

$$M_a := 18380.6236 \text{ N.mm}$$

$$M_b := 760776.56 \text{ N.mm}$$

$$M_c := 18380.6236 \text{ N.mm}$$

$$C_b := \frac{12.5 \cdot M_{max}}{2.5 \cdot M_{max} + 3 \cdot M_a + 4 \cdot M_b + 3 \cdot M_c} \quad C_b = 2.303$$

Admite-se seção simétrica para estas dimensões. E, portanto, para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno de eixo de simetria, define-se o valor de M_{cre} :

$M_{cre} := C_b \cdot r_o \cdot \sqrt{P_{ey} \cdot P_{et}}$, momento crítico de flambagem elástica lateral com torção, para barra com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno de eixo de simetria (eixo x).

$$M_{cre} = 7.901 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

1.1.2.2 - Determinação do momento fletor resistente nominal para flambagem lateral com torção: M_{ne}

I - Módulo de resistência elástica da seção bruta em relação à fibra comprimida: W_c

$$W_c := \frac{I_x}{y_{cg}} \quad W_c = 1.001 \times 10^4$$

II - Momento para início da plastificação da seção: M_y

$$M_y := W_c \cdot f_y \quad M_y = 1.802 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$M_{ne} := \begin{cases} M_{cre} & \text{if } M_{cre} \leq 0.56 \cdot M_y \\ \left(\frac{10}{9}\right) \cdot M_y \cdot \left(1 - \frac{10 \cdot M_y}{36 \cdot M_{cre}}\right) & \text{if } 2.78 \cdot M_y \geq M_{cre} \geq 0.56 \cdot M_y \\ M_y & \text{if } M_{cre} > 2.78 \cdot M_y \end{cases}$$

$$M_{ne} = 1.802 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

1.1.2.3 - Determinação do momento de flambagem elástica local: M_{cr1}

$M_{cr1} / M_y =$ fator local

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO II.1.6.

$$\text{fatorlocal} := 9.48$$

$$M_{cr1} := \text{fatorlocal} \cdot M_y$$

$$M_{cr1} = 1.708 \times 10^7 \text{ N.mm}$$

1.1.2.4 - Determinação do momento de flambagem elástica distorcional: M_{crd}

$M_{crd} / M_y =$ fator distorcional

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator distorcional no ANEXO II.1.7.

$$\text{fatordist} := 3.90$$

$$M_{crd} := \text{fatordist} \cdot M_y$$

$$M_{crd} = 7.026 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

1.1.2.5 - Determinação do momento fletor resistente nominal para flambagem local: M_{nl}

$$\lambda_{\text{Local}} := \left(\frac{M_{ne}}{M_{cr1}}\right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{Local}} = 0.325$$

$$M_{nl} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.15 \cdot \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}}\right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}}\right)^{0.4} \cdot M_{ne} \right] & \text{if } \lambda_{\text{Local}} > 0.776 \\ M_{ne} & \text{if } \lambda_{\text{Local}} \leq 0.776 \end{cases}$$

$$M_{nl} = 1.802 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

1.1.2.6 - Determinação do momento fletor resistente nominal para flambagem distorcional: Mnd

$$\lambda_{\text{distorcional}} := \left(\frac{M_y}{M_{\text{crd}}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{distorcional}} = 0.506$$

$$M_{\text{nd}} := \begin{cases} \left[1 - 0.22 \cdot \left(\frac{M_{\text{crd}}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \cdot \left(\frac{M_{\text{crd}}}{M_y} \right)^{0.5} \cdot M_y & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} > 0.673 \\ M_y & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} \leq 0.673 \end{cases}$$

$$M_{\text{nd}} = 1.802 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

1.1.2.7 - Valor do momento fletor resistente nominal: Mn

$$M_n := \min(M_{\text{ne}}, M_{\text{nl}}, M_{\text{nd}})$$

$$M_n = 1.802 \times 10^6 \text{ N.mm} \quad \text{Início da plastificação na seção do apoio}$$

1.1.2.8 - Valor do momento resistente de cálculo³

$$M_{\text{resistente}} = \Phi_b \cdot M_n$$

$$M_{\text{resistente}} := 0.85 \cdot M_n$$

$$M_{\text{resistente}} = 1.531 \times 10^6 \text{ N.mm, ou seja, } 1.531 \text{ kN.m}$$

1.1.3 - Cálculo do valor de cada força concentrada máxima que pode ser aplicada neste tipo de longarina considerando o momento máximo resistente

I - Sabe-se que o momento resistente calculado anteriormente corresponde ao momento de engastamento, por se tratar de viga biengastada;

II - Para este cálculo basta fazer a operação inversa da utilizada para o cálculo do momento solicitante.

³ Existem limitações quanto a geometria e quanto ao material (tabela 1.1.1.2 do apêndice 1 da AISI [2]) para as peças calculadas por este método. O fator de calibração Ω e o fator de resistência Φ_b definidos são para perfis previamente testados (ensaiados). Porém, será feita uma aproximação e usado esses fatores para resolução deste projeto, já que esse perfil não se enquadra na tabela citada.

$$\text{Meng} := 1.802 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$L = 2.5 \times 10^3 \text{ mm}$$

$$n := 4$$

$$a_1 := 150 \text{ mm}$$

$$b_1 := 2350 \text{ mm}$$

$$a_2 := 1150 \text{ mm}$$

$$b_2 := 1350 \text{ mm}$$

$$a_3 := 1350 \text{ mm}$$

$$b_3 := 1150 \text{ mm}$$

$$a_4 := 2350 \text{ mm}$$

$$b_4 := 150 \text{ mm}$$

$$F := \frac{\text{Meng} \cdot L^2}{\left[\sum_{i=1}^n a_i \cdot (b_i)^2 \right]} \quad F = 2.365 \times 10^3 \text{ N}$$

1.1.4 - Verificação de Esmagamento de Alma (conforme Anexo E da NBR 14762:2001 [1])

Nesse projeto existem forças concentradas atuando perpendicularmente ao eixo longitudinal da longarina, causando compressão na alma. Para o cálculo da resistência dessa longarina, será usado o Anexo E da NBR 14762:2001 [1].

Neste caso, temos:

- Perfil com alma simples, ou seja, não associada, como, por exemplo, perfis U, Z, cartola, caixão, etc;
- Mesas AA (apoiada-apoiada);
- Força interna, e distância do apoio maior ou igual a 1,5 h.

Sendo:

c - comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicada, em milímetros.

h - largura da alma (parte plana da alma), em milímetros.

t - espessura da alma, em milímetros.

r_i - raio interno de dobramento, em milímetros.

θ - ângulo entre o plano da alma e o plano da superfície de apoio, em graus.

$$\gamma := 1.35$$

$$c := 203.2$$

$$h := 109.3292$$

$$t := 1.5$$

$$r_i := 1.5$$

$$\theta := 90$$

$$C_1 := \left[1.22 - \left(197 \cdot \frac{f_y}{E} \right) \right]$$

$$C_1 = 1.047$$

$$C_2 := \left[1.06 - \left(0.06 \cdot \frac{r_i}{t} \right) \right]$$

$$C_2 = 1$$

$$C_\theta := 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{\theta}{90} \right)^2$$

$$C_9 := 6.9$$

$$C_\theta = 1$$

$$F_{rd} := \begin{cases} \left(\frac{894 \cdot f_y}{E} \right) \cdot t^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_9 \cdot C_\theta \cdot \left[538 - 0.74 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) \right] \cdot \left[1 + 0.007 \cdot \left(\frac{c}{t} \right) \right] \cdot \frac{1}{\gamma} & \text{if } \left(\frac{c}{t} \right) \leq 60 \\ \left(\frac{894 \cdot f_y}{E} \right) \cdot t^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_9 \cdot C_\theta \cdot \left[538 - 0.74 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) \right] \cdot \left[0.75 + 0.011 \cdot \left(\frac{c}{t} \right) \right] \cdot \frac{1}{\gamma} & \text{if } \left(\frac{c}{t} \right) > 60 \end{cases}$$

$$F_{rd} = 1.025 \times 10^4 \text{ N}$$

Segundo os resultados teóricos o colapso deve ocorrer por início da plastificação da seção do apoio, visto que a resistência da longarina ao esmagamento de alma para cada uma das cargas concentradas aplicadas perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça é superior. Porém, o perfil utilizado neste projeto não se enquadra perfeitamente nas condições descritas no Anexo F da NBR 14762:2001[1].

Sendo assim, faz-se necessário a utilização de experimentos, conforme item F.2 da mesma norma, para que o dimensionamento seja ratificado.

$$P_1 = 31.477 \text{ N}$$

$$P_2 := \frac{(c2 \cdot m)}{2} + \frac{(c5 \cdot m)}{4}$$

$$P_2 = 31.518 \text{ N}$$

$$P_3 := \frac{(c3 \cdot m)}{2} + \frac{(c6 \cdot m)}{4}$$

$$P_3 = 31.641 \text{ N}$$

$$P_4 := \frac{(c4 \cdot m)}{2} + \frac{(c6 \cdot m)}{4}$$

$$P_4 = 31.422 \text{ N}$$

II - Acréscimo de carregamento

Dos ensaios (conforme ANEXO I), temos:

Carga máxima = 42.51 kN

Carga máxima dos pallets

$$f := \frac{42.52 \times 10^3}{8}$$

$$f = 5.314 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_1 := P_1 + f$$

$$F_2 := P_2 + f$$

$$F_3 := P_3 + f$$

$$F_4 := P_4 + f$$

Comprimento da longarina

$$L := 2500 \text{ mm}$$

III - Reações de apoio e esforços solicitantes ao longo da longarina para carregamento total, conforme Figura 4.

$$n := 4 \qquad a_1 := 150 \text{ mm} \qquad a_2 := 1150 \text{ mm}$$

$$a_3 := 1350 \text{ mm} \qquad a_4 := 2350 \text{ mm} \qquad b_1 := 2350 \text{ mm}$$

$$b_2 := 1350 \text{ mm} \qquad b_3 := 1150 \text{ mm} \qquad b_4 := 150 \text{ mm}$$

III.1- Momento Fletor

$$\text{Meng1} := \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot a_i \cdot (b_i)^2}{L^2}$$

$$\text{Meng1} = 4.074 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\text{Meng2} := \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot (a_i)^2 \cdot b_i}{L^2}$$

$$\text{Meng2} = 4.074 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

III.2 - Cortante

$$\text{Veng1} := \frac{\text{Meng1} - \text{Meng2}}{L} + \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot b_i}{L}$$

$$\text{Veng1} = 1.069 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\text{Veng2} := \sum_{i=1}^n F_i - \text{Veng1}$$

$$\text{Veng2} = 1.069 \times 10^4 \text{ N}$$

III.3 - Esforços ao longo da longarina

III.3.1 - Momento fletor em função de x

$$M(x) := -\text{Meng1} + \text{Veng1} \cdot x - \sum_{i=1}^n F_i \cdot (x - a_i)$$

para qualquer a_i menor ou igual a x

III.3.2 - Cortante em função de x

$$V(x) := \text{Veng1} - \sum_{i=1}^n F_i$$

para qualquer a_i menor ou igual a x

**Tabela 2 - Esforços Solicitantes na longarina EL 115 O 1,50 mm em função de x
(comprimento = 2500 mm)**

x(mm)	M(x) (N.mm)	V(x) (N)
0	-4074079,3	10693056,7
100	-3004773,6	10693056,7
200	-2202792,0	5346576,7
300	-1668134,3	5346576,7
400	-1133476,6	5346576,7
500	-598819,0	5346576,7
600	-64161,3	5346576,7
625	69503,1	5346576,7
700	470496,4	5346576,7
800	1005154,0	5346576,7
900	1539811,7	5346576,7
1000	2074469,4	5346576,7
1100	2609127,1	5346576,7
1200	2876458,7	56,7
1250	2876461,6	56,7
1300	2876464,4	56,7
1400	2609137,6	-5346593,3
1500	2074478,2	-5346593,3
1600	1539818,9	-5346593,3
1700	1005159,6	-5346593,3
1800	470500,2	-5346593,3
1875	69505,7	-5346593,3
1900	-64159,1	-5346593,3
2000	-598818,4	-5346593,3
2100	-1133477,7	-5346593,3
2200	-1668137,1	-5346593,3
2300	-2202796,4	-5346593,3
2400	-2737455,7	-10693023,3
2500	-4074079,6	-10693023,3

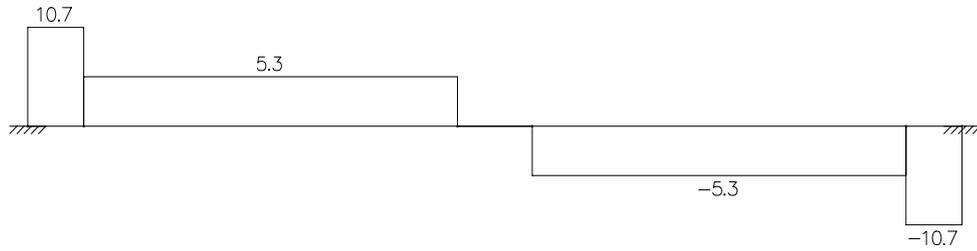


Figura 8 - Diagrama de Esforço Cortante - DEC (kN). Fonte: FTOOL

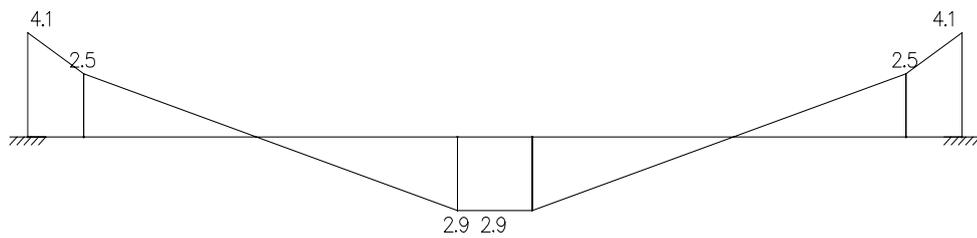


Figura 9 - Diagrama de Momento Fletor - DMF (kNm). Fonte: FTOOL

1.2.2 - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]

I - Propriedades do material

Aço SAE 1008

$E = 205000 \text{ MPa}$

$G = 78000 \text{ MPa}$

$f_y = 180 \text{ MPa}$ - no caso de aços sem qualificação estrutural, conforme item 4.2 da NBR 14762:2001[1], não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento.

II - Parâmetros referentes às condições de contorno da longarina

II.1 - Parâmetros de flambagem na flexão para ambas extremidades com rotação impedida - k recomendado, conforme Anexo H da NBR 8800:2003[6]

$$K_y := 0.65$$

$$K_x := 0.65$$

II.2 - Parâmetro de flambagem na torção para ambas extremidades com rotação e empenamento impedidos

$$K_t := 0.5$$

III - Propriedades geométricas da seção bruta (extraídas do programa CUFSM, conforme ANEXO II.2.2)

$$L := 2500 \text{ mm}$$

$$A_g := 663.9497 \text{ mm}^2$$

$$I_x := 1395391.1256 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 177969.654 \text{ mm}^4$$

$$I_t := \frac{4 \cdot t \cdot A_m^2}{L_m}$$

$$I_t = 329823.0 \text{ mm}^4$$

$$x_{cg} := 19.561 \text{ mm}$$

$$y_{cg} := 59.1026 \text{ mm}$$

$$X_s := -14.8536 \text{ mm}$$

$$Y_s := 160.0 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$x_o := x_{cg} - X_s$$

$$y_o := y_{cg} - Y_s$$

$$r_x = 45.844 \text{ mm}$$

$$r_y = 16.372 \text{ mm}$$

$$x_o = 34.415 \text{ mm}$$

$$y_o = -100.897 \text{ mm}$$

$$r_o := \sqrt{(r_x^2) + (r_y^2) + (x_o^2) + (y_o^2)}$$

$$r_o = 117.194 \text{ mm}$$

1.2.2.1 - Cálculo do momento fletor de flambagem elástica lateral com torção (conforme item 7.8.1.2 da NBR 14762:2001[1]): M_{cre}

I - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y: P_{ey}

$$P_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2}$$

$$P_{ey} = 1.364 \times 10^5 \text{ N}$$

II - Coeficiente de equivalência de momento na flexão

$$C_b = (12,5xM_{max}) / (2,5xM_{max} + 3xM_a + 4xM_b + 3xM_c)$$

M_{max} é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado.

M_a é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 1º quarto do trecho analisado.

Mb é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no centro do trecho analisado.

Mc é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no 3º quarto do trecho analisado.

$$M_{\max} := 4074079.313 \text{ N.mm}$$

$$M_a := 69503.1236 \text{ N.mm}$$

$$M_b := 2876461.56 \text{ N.mm}$$

$$M_c := 69505.7464 \text{ N.mm}$$

$$C_b := \frac{12.5 \cdot M_{\max}}{2.5 \cdot M_{\max} + 3 \cdot M_a + 4 \cdot M_b + 3 \cdot M_c} \quad C_b = 2.304$$

Admite-se seção simétrica para estas dimensões. E, portanto, para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno de eixo de simetria, define-se o valor de Mcre:

$M_{cre} := C_b \cdot \sqrt{P_{ey} \cdot G \cdot I_t}$, momento crítico de flambagem elástica lateral com torção, para barra com seção fechada (caixão), sujeita à flexão em torno do eixo x.

$$M_{cre} = 1.364 \times 10^8 \text{ N.mm}$$

1.2.2.2 - Determinação do momento fletor resistente nominal para flambagem lateral com torção: Mne

I - Módulo de resistência elástica da seção bruta em relação à fibra comprimida: Wc

$$W_c := \frac{I_x}{y_{cg}} \quad W_c = 2.361 \times 10^4$$

II - Momento para início da plastificação da seção: My

$$M_y := W_c \cdot f_y \quad M_y = 4.25 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$M_{ne} := \begin{cases} M_{cre} & \text{if } M_{cre} \leq 0.56 \cdot M_y \\ \left(\frac{10}{9}\right) \cdot M_y \cdot \left(1 - \frac{10 \cdot M_y}{36 \cdot M_{cre}}\right) & \text{if } 2.78 \cdot M_y \geq M_{cre} \geq 0.56 \cdot M_y \\ M_y & \text{if } M_{cre} > 2.78 \cdot M_y \end{cases}$$

$$M_{ne} = 4.25 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

1.2.2.3 - Determinação do momento de flambagem elástica local: M_{cr1}

$M_{cr1} / M_y =$ fator local

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO II.2.3.

fatorlocal:= 6.73

$M_{cr1} :=$ fatorlocal $\cdot M_y$

$$M_{cr1} = 2.86 \times 10^7 \text{ N.mm}$$

1.2.2.4 - Determinação do momento fletor resistente nominal para flambagem local: M_{nl}

$$\lambda_{Local} := \left(\frac{M_{ne}}{M_{cr1}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{Local} = 0.385$$

$$M_{nl} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.15 \cdot \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \cdot M_{ne} \right] & \text{if } \lambda_{Local} > 0.776 \\ M_{ne} & \text{if } \lambda_{Local} \leq 0.776 \end{cases}$$

$$M_{nl} = 4.25 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

1.2.2.5 - Valor do momento fletor resistente nominal: M_n

$M_n := \min (M_{ne}, M_{nl})$

$$M_n = 4.25 \times 10^6 \text{ N.mm} \quad \text{Início da plastificação na seção do apoio}$$

1.2.2.6 - Valor do momento resistente de cálculo⁴

$M_{resistente} = \Phi_b \cdot M_n$

$M_{resistente} := 0.85 \cdot M_n$

$$M_{resistente} = 3.612 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

⁴ Existem limitações quanto a geometria e quanto ao material (tabela 1.1.1.2 do apêndice 1 da AISI[2]) para as peças calculadas por este método. O fator de calibração Ω e o fator de resistência Φ_b definidos são para perfis previamente testados (ensaiados). Porém, será feita uma aproximação e usado esses fatores para resolução deste projeto, já que esse perfil não se enquadra na tabela citada.

1.2.3 - Cálculo do valor de cada força concentrada máxima que pode ser aplicada neste tipo de longarina considerando o momento máximo resistente

I - Sabe-se que o momento resistente calculado anteriormente corresponde ao momento de engastamento, por se tratar de viga biengastada;

II - Para este cálculo basta fazer a operação inversa da utilizada para o cálculo do momento solicitante.

$$M_{eng} := 4.25 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$L = 2.5 \times 10^3 \text{ mm}$$

$$n := 4$$

$$a_1 := 150 \text{ mm}$$

$$b_1 := 2350 \text{ mm}$$

$$a_2 := 1150 \text{ mm}$$

$$b_2 := 1350 \text{ mm}$$

$$a_3 := 1350 \text{ mm}$$

$$b_3 := 1150 \text{ mm}$$

$$F := \frac{M_{eng} \cdot L^2}{\left[\sum_{i=1}^n a_i \cdot (b_i)^2 \right]}$$

$$F = 5.577 \times 10^3 \text{ N}$$

1.2.4 - Verificação de Esmagamento de Alma (conforme Anexo E da NBR 14762:2001[1])

Nesse projeto existem forças concentradas atuando perpendicularmente ao eixo longitudinal da longarina, causando compressão na alma. Para o cálculo da resistente dessa longarina, será usado o Anexo E da NBR 14762:2001[1].

Neste caso, temos:

- Perfil com alma simples, ou seja, não associada, como, por exemplo, perfis U, Z, cartola, caixão, etc;
- Mesas AA (apoiada-apoiada);
- Força interna, e distância do apoio maior ou igual a 1,5 h.

Sendo:

c - comprimento, na direção longitudinal da barra, de atuação da força aplicada, em milímetros.

h - largura da alma (parte plana da alma), em milímetros.

t - espessura da alma, em milímetros.

r_i - raio interno de dobramento, em milímetros.

θ - angulo entre o plano da alma e o plano da superfície de apoio, em graus.

$$\gamma := 1.35$$

$$c := 203.2$$

$$h := 118.2052$$

$$t := 1.5$$

$$r_i := 1.5$$

$$\theta := 90$$

$$C_1 := \left[1.22 - \left(197 \cdot \frac{f_y}{E} \right) \right]$$

$$C_1 = 1.047$$

$$C_2 := \left[1.06 - \left(0.06 \cdot \frac{r_i}{t} \right) \right]$$

$$C_2 = 1$$

$$C_\theta := 0.7 + 0.3 \cdot \left(\frac{\theta}{90} \right)^2$$

$$C_9 := 6.9$$

$$C_\theta = 1$$

$$F_{rd} := \begin{cases} \left(\frac{894 \cdot f_y}{E} \right) \cdot t^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_9 \cdot C_\theta \cdot \left[538 - 0.74 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) \right] \cdot \left[1 + 0.007 \cdot \left(\frac{c}{t} \right) \right] \cdot \frac{1}{\gamma} & \text{if } \left(\frac{c}{t} \right) \leq 60 \\ \left(\frac{894 \cdot f_y}{E} \right) \cdot t^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_9 \cdot C_\theta \cdot \left[538 - 0.74 \cdot \left(\frac{h}{t} \right) \right] \cdot \left[0.75 + 0.011 \cdot \left(\frac{c}{t} \right) \right] \cdot \frac{1}{\gamma} & \text{if } \left(\frac{c}{t} \right) > 60 \end{cases}$$

$$F_{rd} = 1.016 \times 10^4 \text{ N}$$

A força acima precisa ainda ser multiplicada por 2, visto que este perfil possui duas almas para resistir a compressão. Sendo assim,

$$F_{rd} := F_{rd} \cdot 2$$

$$F_{rd} = 2.031 \times 10^4 \text{ N}$$

Segundo os resultados teóricos o colapso deve ocorrer por início da plastificação da seção do apoio, visto que a resistência da longarina ao esmagamento de alma para cada uma das cargas concentradas aplicadas perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça é superior. Porém, o perfil utilizado neste projeto não se enquadra perfeitamente nas condições descritas no Anexo F da NBR 14762:2001[1].

Sendo assim, faz-se necessário a utilização de experimentos, conforme item F.2 da mesma norma, para que o dimensionamento seja ratificado.

2 - Abordagem Experimental

2.1 - Ensaio da longarina EL 115 C 1,50 mm

I - Montagem do ensaio

O ensaio foi desenvolvido por técnicos do Laboratório de Estruturas (LABEST) na placa de reação da COPPE/UFRJ e supervisionado pelo Professor orientador.

A montagem foi executada de acordo com as especificações do fabricante do sistema porta-pallet. Sendo assim, cada longarina foi solicitada em quatro pontos de forma aproximadamente concentrada, com auxílio de vigas metálicas com características já vistas.

O carregamento foi aplicado até o colapso por dois atuadores hidráulicos servo-controlados de aplicação de carga. Cada atuador tem a capacidade de 49,1 kN (5 tf). A carga total aplicada no experimento foi o somatório da carga aplicada através dos dois atuadores.

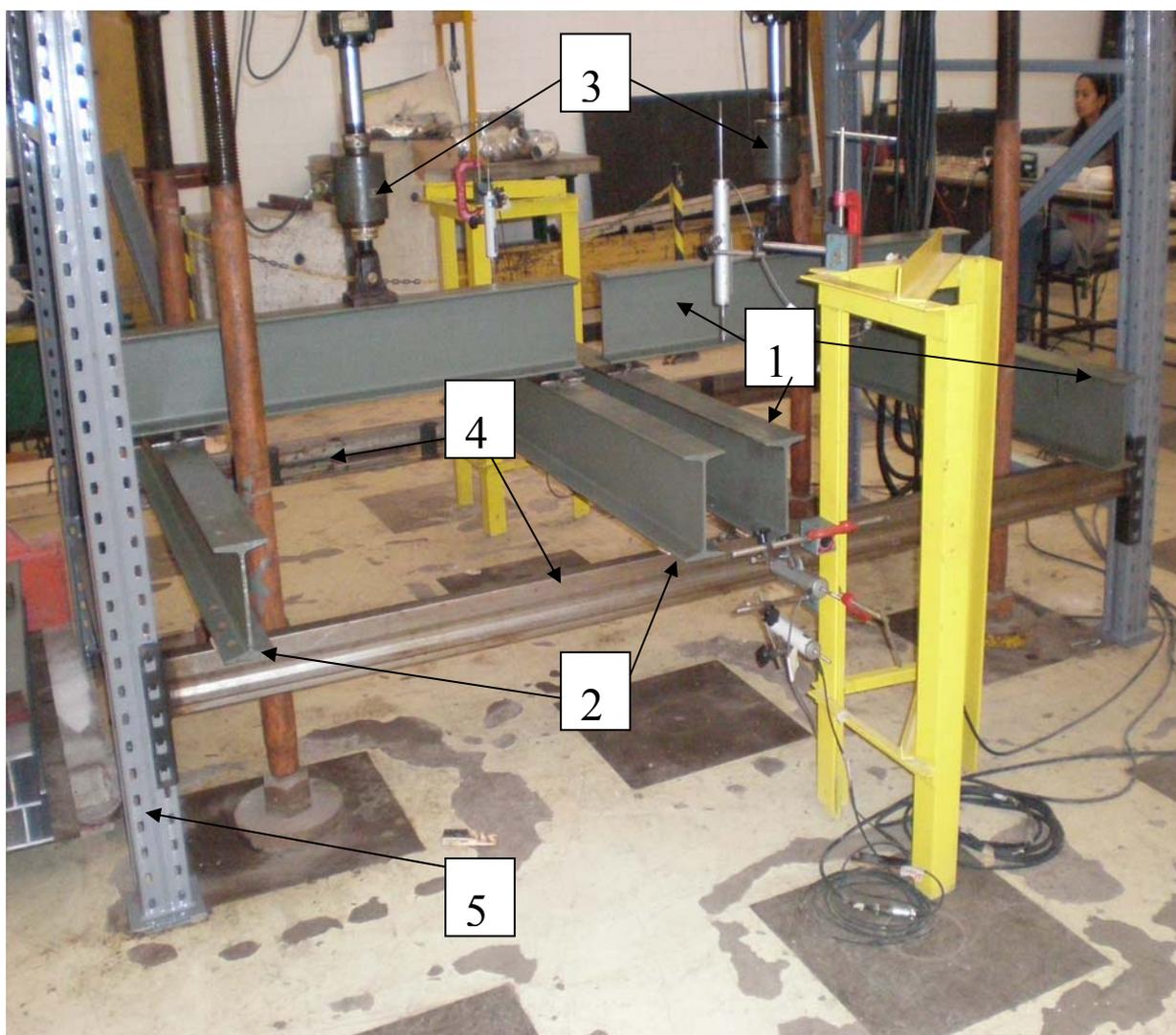


Foto 1 - Montagem do ensaio da longarina de seção aberta: 1 - Vigas de montagem; 2 - Pontos de aplicação da carga na longarina; 3 - Atuadores hidráulicos de 5 tf; 4 - Longarinas a serem ensaiadas; 5 - Montante.

II - Aquisição de dados

Os transdutores de deslocamentos, também chamados flexímetros, foram instalados em posições adequadas para captar deslocamentos causados por solicitações já esperados, como flexão, torção e flambagem lateral com torção nas longarinas. Foi utilizado um fio de aço na ponta de cada flexímetro, pois já se esperava um colapso brusco, e caso os flexímetros fossem colocados diretamente na superfície do perfil poderia causar algum dano ao mesmo.

Durante o ensaio os flexímetros captavam deslocamentos e estes eram enviados por sinais elétricos, através de cabos, ao sistema de aquisição LYNX (sistema de condicionamento e aquisição de dados LYNX ADS 2000).

O sistema LYNX faz a leitura em voltagem e transforma em unidades de engenharia. Para os deslocamentos de cada ponto definido, o software *Aq dados*, faz a transformação de sinais elétricos em unidades de deslocamentos, por meio da multiplicação da voltagem pela constante de calibração de cada sensor.

Os deslocamentos captados em cada flexímetros para a carga aplicada estão no ANEXO I.

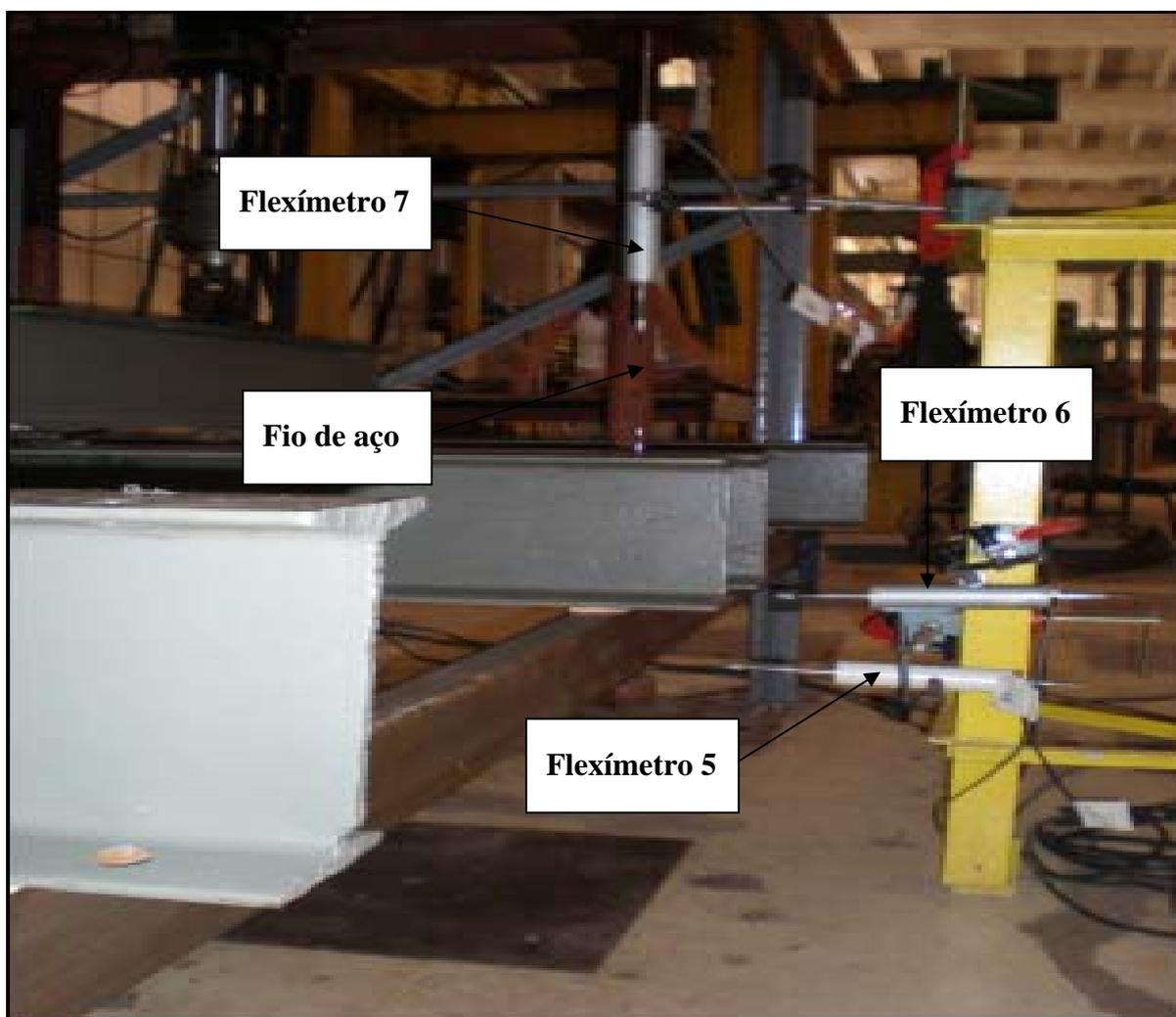


Foto 2 - Aquisição de deslocamentos: Flexímetros 7 (Flexímetro 2, para a longarina oposta); Flexímetros 6 (Flexímetro 3, para a longarina oposta); Flexímetros 5 (Flexímetro 4, para a longarina oposta);

Os flexímetros 2 e 7 medem a flecha vertical nas duas longarinas; os pares de flexímetros 3, 4 e 5, 6 medem as rotações de torção da viga e flechas transversais nas duas longarinas ensaiadas.

Do gráfico 1, pode-se perceber os deslocamentos opostos de cada par de flexímetro, caracterizando a torção. Por exemplo, o par 5, 6 (ver foto 2): durante a aplicação da carga a peça torce (ver foto 4), o flexímetro 6 apresenta deslocamentos “positivos” e 5 deslocamentos “negativos”. O positivo e negativo revelam os sentidos opostos que tomam os deslocamentos medidos pelos flexímetros devido a torção.

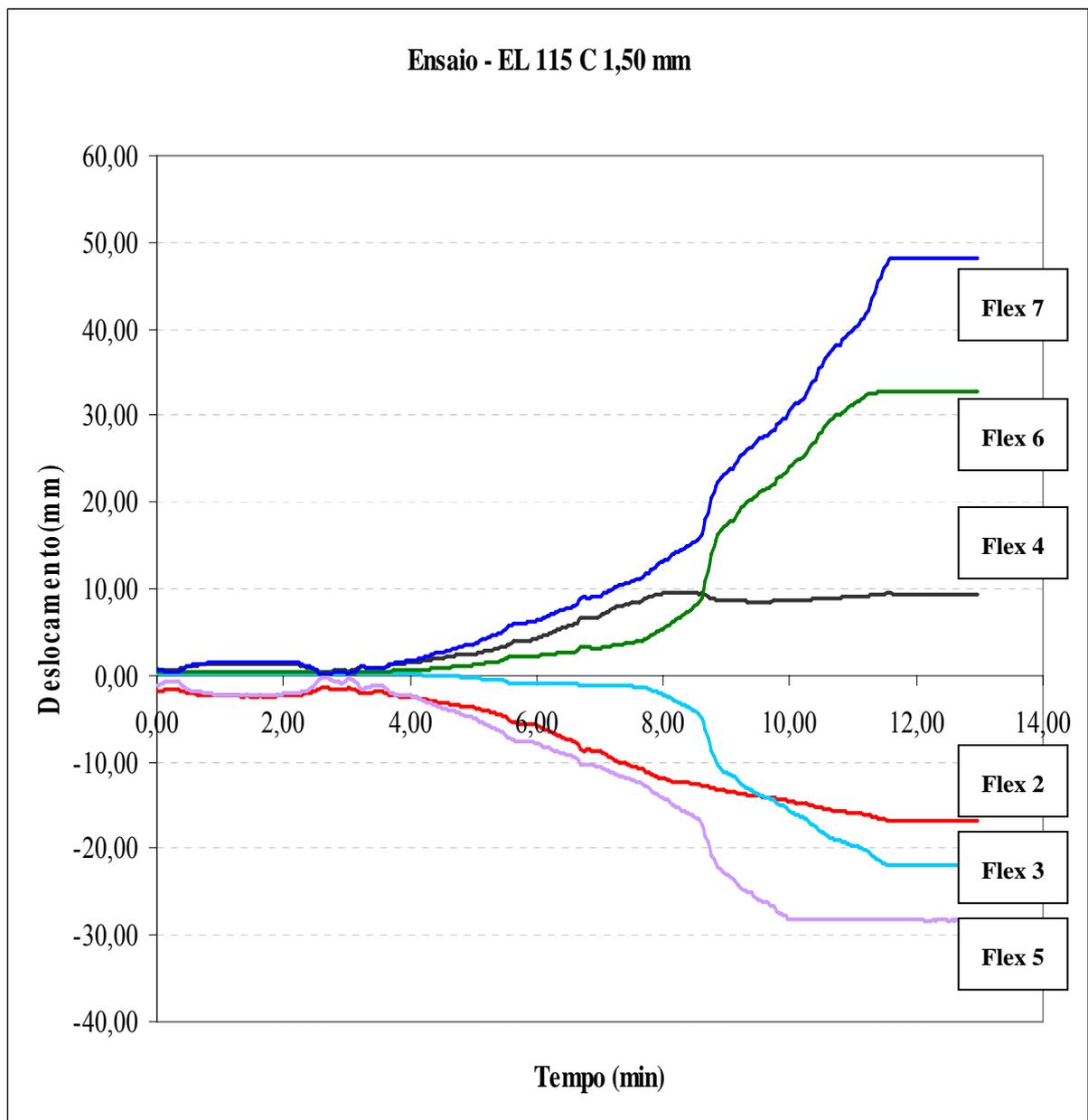


Gráfico 1 - Tempo x Deslocamento - EL 115 C 1,50 mm

III - Condições de apoio

As longarinas estavam engastadas nos montantes, ou seja, os deslocamentos de translação e rotação estavam impedidos, por meio de sistemas de garras conforme apresentada na foto 3.

Esses engastamentos foram projetados de maneira que não ocorresse o colapso nos mesmos, ou seja, eram resistentes o suficiente para que o colapso ocorresse por flexão ao longo da longarina.

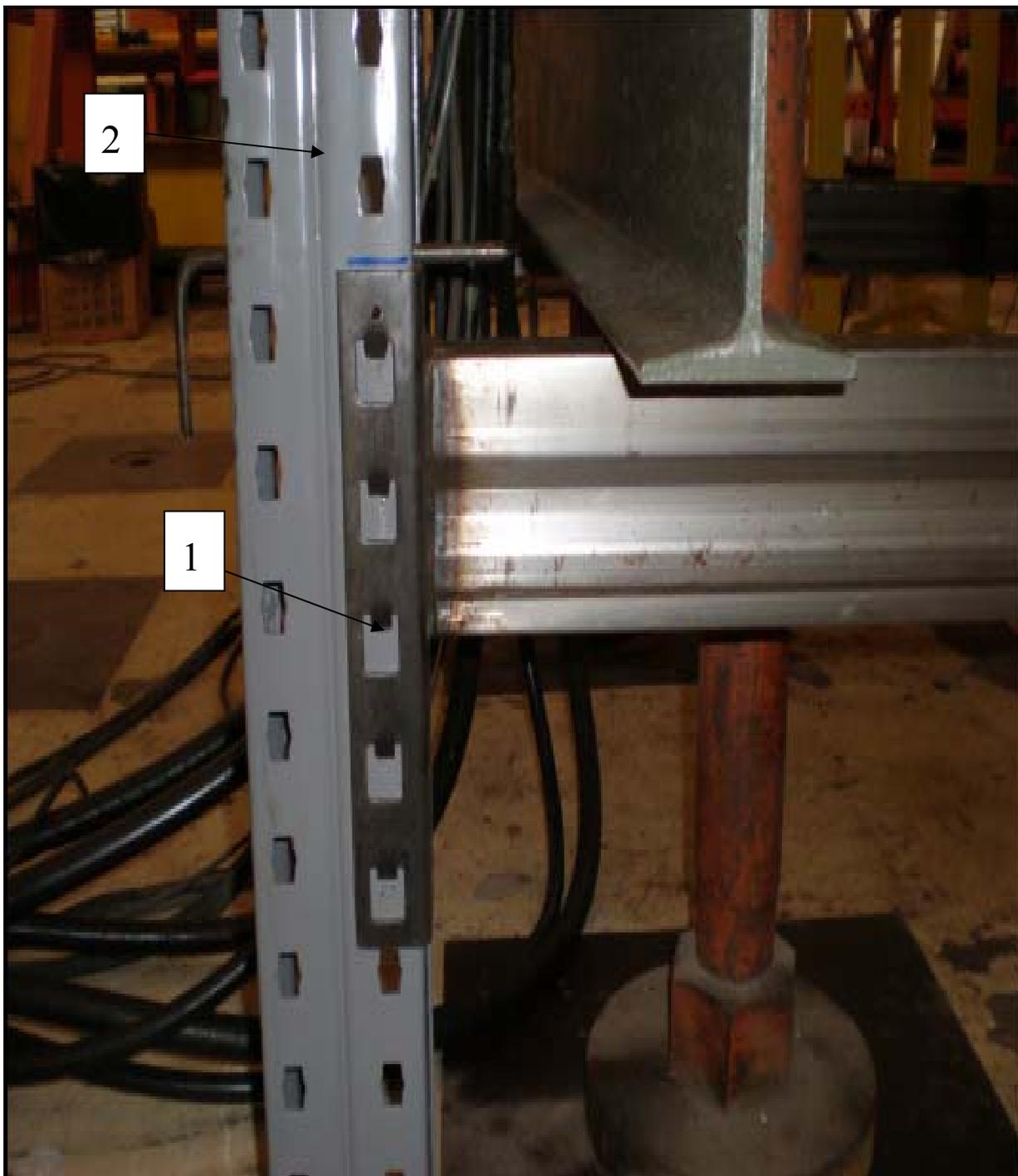


Foto 3 - Longarina biengastada: 1 - Engaste; 2 - Montante.

IV - O colapso

A longarina sofre torção desde o início do carregamento devido à resultante do carregamento não estar aplicada no centro de cisalhamento conforme figura 10.

Durante o ensaio, a aplicação de torção aumenta devido ao deslocamento imposto pelas vigas de montagem, que sendo empurrada pela torção de uma das longarinas aumenta a torção na longarina oposta. O gráfico que retrata os deslocamentos com aplicação da carga está no ANEXO I.

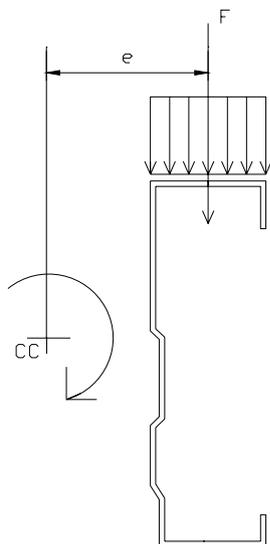


Figura 10 - Torção inicial aplicada

A longarina de seção aberta apresentou torção progressiva durante o ensaio.



Foto 4 - Longarina sofre torção durante o ensaio.

No gráfico 2, há evidência do colapso por torção: com o acréscimo de carga o flexímetro 5 (no gráfico 2, flex 5) apresenta deslocamentos transversais que aumentam até o colapso da longarina.

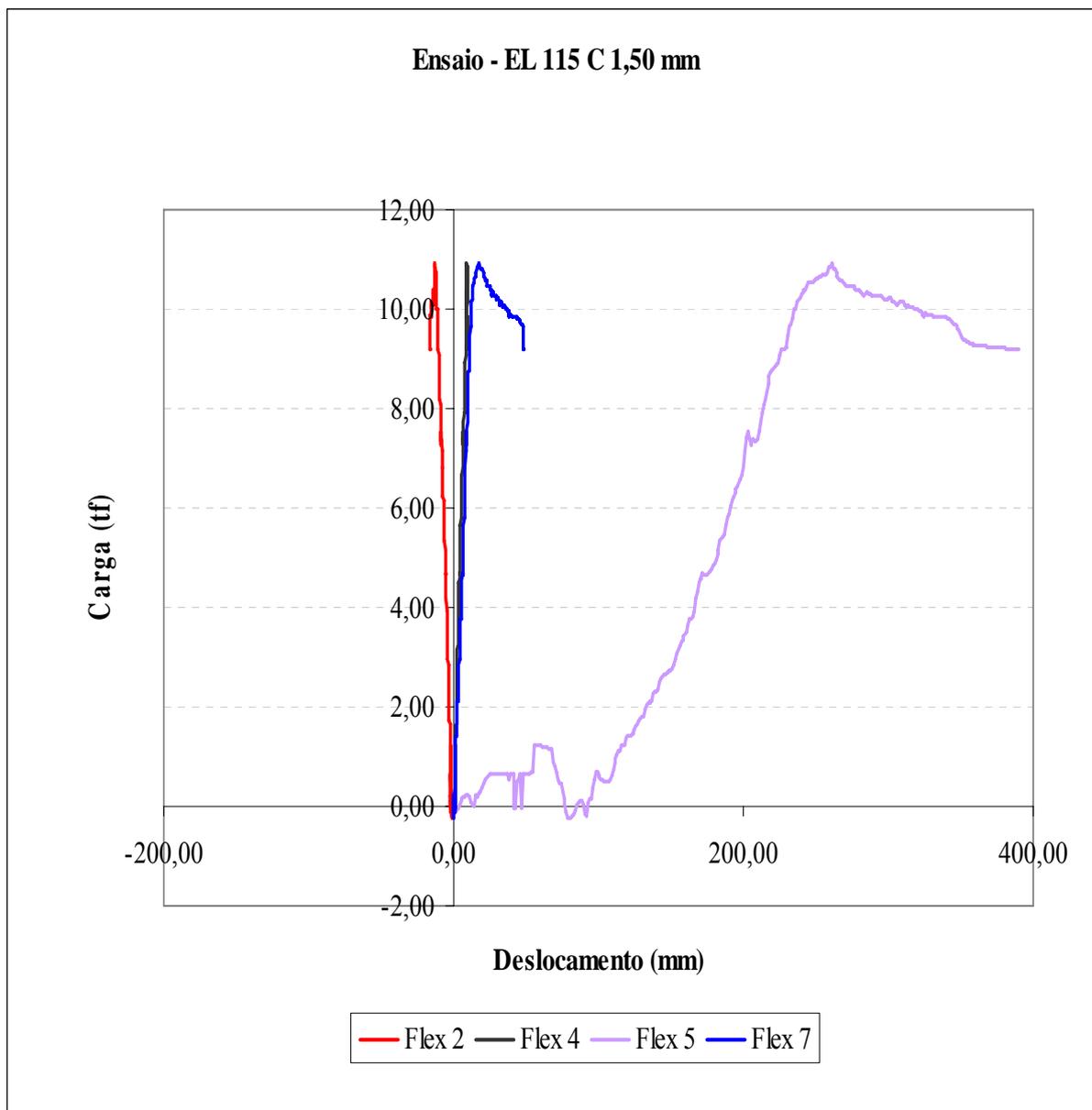


Gráfico 2 - Deslocamento x Carga - EL 115 C 1,50 mm

2.2 - Ensaio da longarina EL 115 O 1,50 mm

I - Montagem do ensaio

Da mesma forma que no ensaio da longarina de seção aberta, o ensaio foi desenvolvido por técnicos do Laboratório de Estruturas (LABEST) na placa de reação da COPPE/UFRJ e supervisionado pelo Professor Eduardo Batista.

Sendo assim, cada longarina foi solicitada em quatro pontos de forma aproximadamente concentrada, com auxílio de vigas metálicas com características já vistas.

O carregamento foi aplicado até o colapso por dois atuadores hidráulicos servo-controlados de aplicação de carga. Cada atuador tem a capacidade de 49,1 kN (5 tf). A carga total aplicada no experimento foi o somatório da carga aplicada através dos dois atuadores.

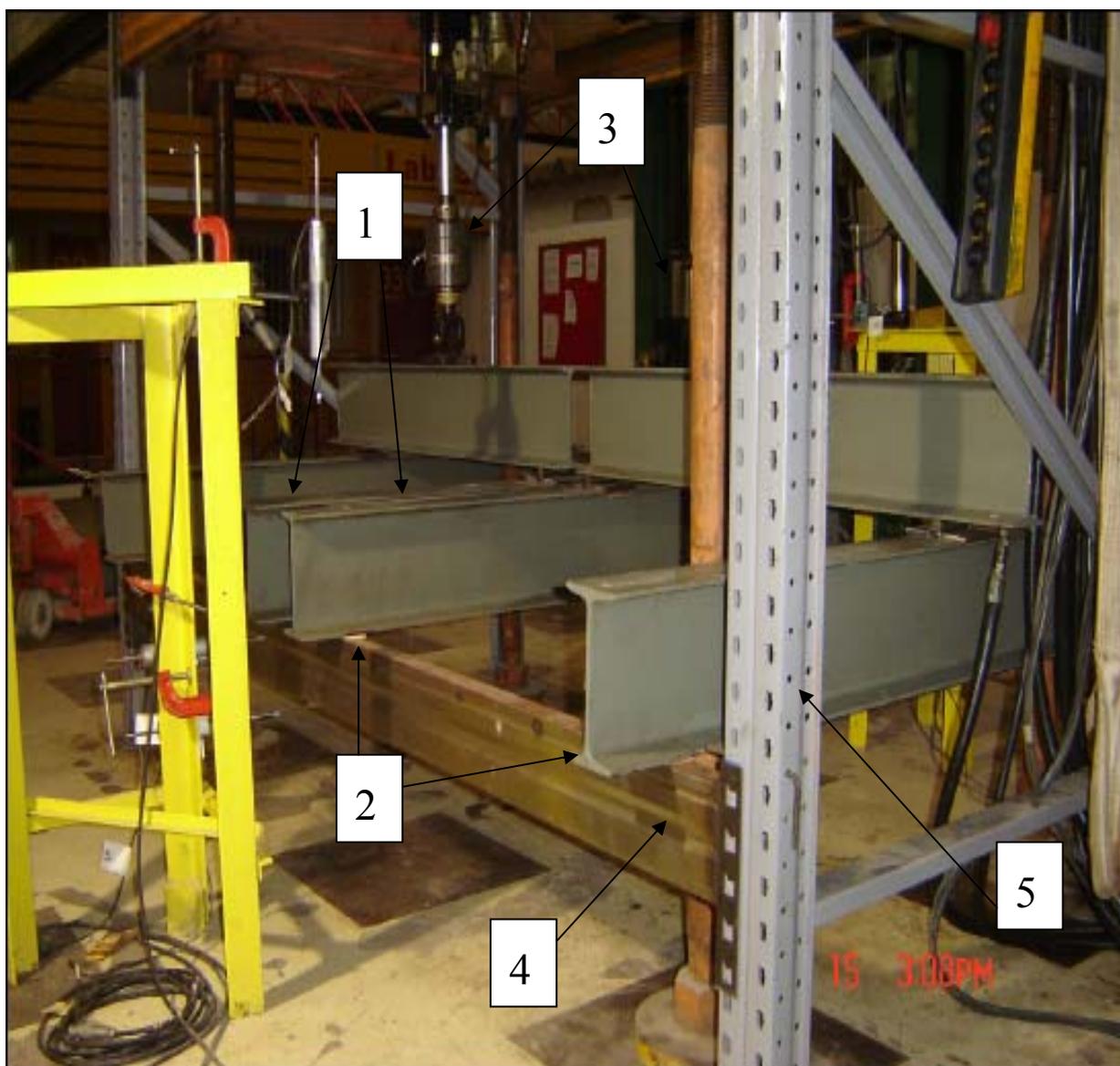


Foto 5 - Montagem do ensaio da longarina de seção fechada: 1- Vigas de montagem; 2 – Pontos de aplicação da carga na longarina; 3 - Atuadores hidráulicos de 5 tf; 4 - Uma das longarinas a serem ensaiadas; 5 - Montante

II - Aquisição de dados

Os transdutores de deslocamentos, também chamados flexímetros, foram instalados em posições adequadas para captar deslocamentos causados por solicitações já esperadas, como flexão, torção e flambagem lateral com torção nas longarinas. Foi utilizado um fio de aço na ponta de cada flexímetro, pois já se esperava um colapso brusco, e caso os flexímetros fossem colocados diretamente na superfície do perfil poderia causar algum dano ao mesmo.

Durante o ensaio os flexímetros captavam deslocamentos e estes eram enviados por sinais elétricos, através de cabos, ao sistema de aquisição LYNX (sistema de condicionamento e aquisição de dados LYNX ADS 2000).

O sistema LYNX faz a leitura em voltagem e transforma em unidades de engenharia, para os deslocamentos de cada ponto definido, o software *Aq dados*, faz a transformação de sinais elétricos em unidades de deslocamentos, por meio da multiplicação da voltagem pela constante de calibração de cada sensor. Os deslocamentos captados em cada flexímetro para a carga aplicada estão no ANEXO I.

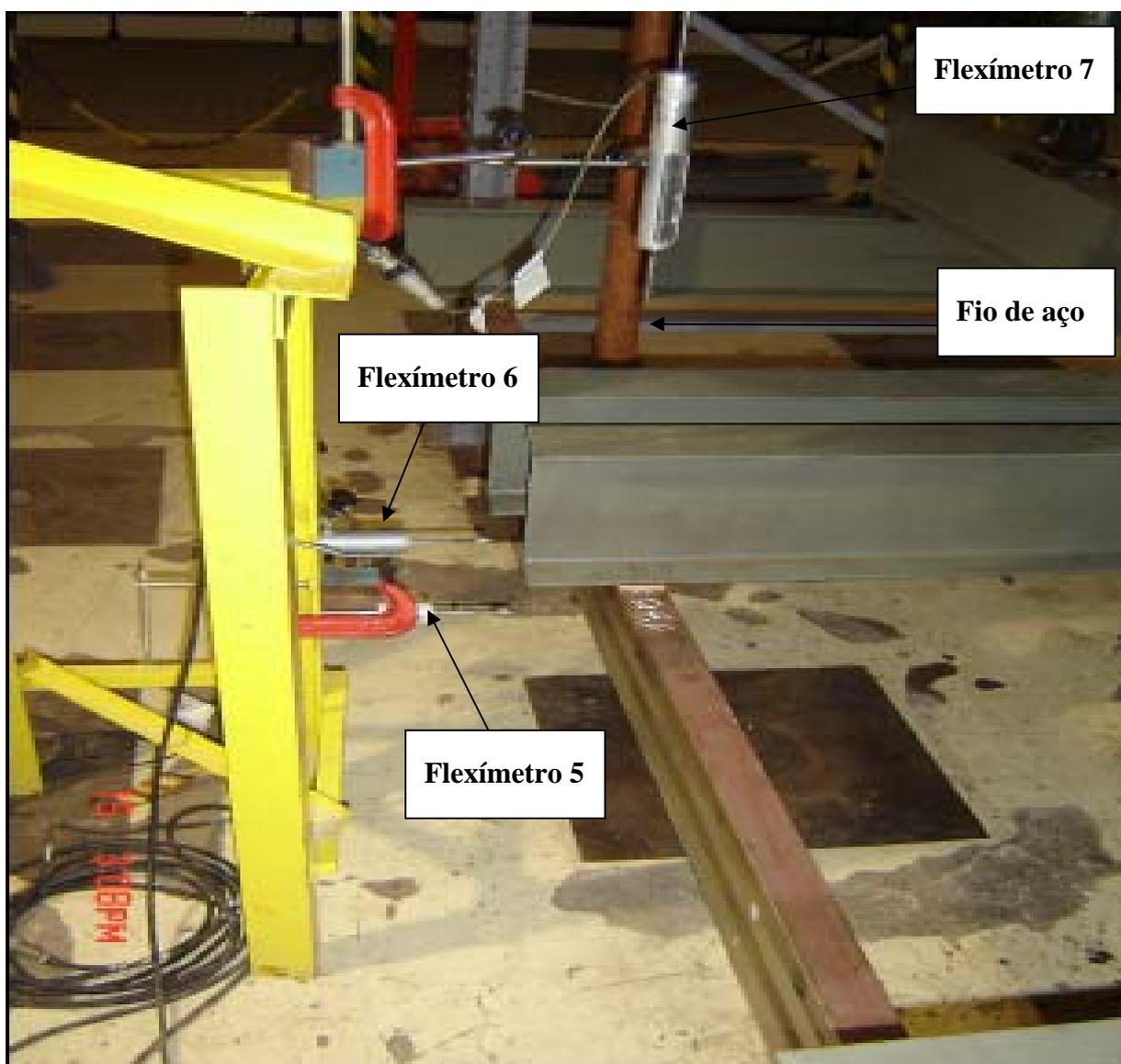


Foto 6 - Aquisição de deslocamentos: Flexímetros 7 (Flexímetro 2, para a longarina oposta) ; Flexímetros 6 (Flexímetro 3, para a longarina oposta); Flexímetros 5 (Flexímetro 4, para a longarina oposta).

Os flexímetros 2 e 7 medem a flecha vertical nas duas longarinas; os pares de flexímetros 3, 4 e 5, 6 medem as rotações de torção da viga e flechas transversais nas duas longarinas ensaiadas.

Do gráfico 3, pode-se perceber que os pares 5,6 apresentam deslocamentos no mesmo sentido, evidenciando a desprezível torção da longarina.

Os deslocamentos no flexímetro 7 (vertical) são maiores e indicam flexão. Com o decorrer do ensaio é confirmado o deslocamento maior na direção vertical. O colapso se dará, a princípio, por esmagamento de alma.

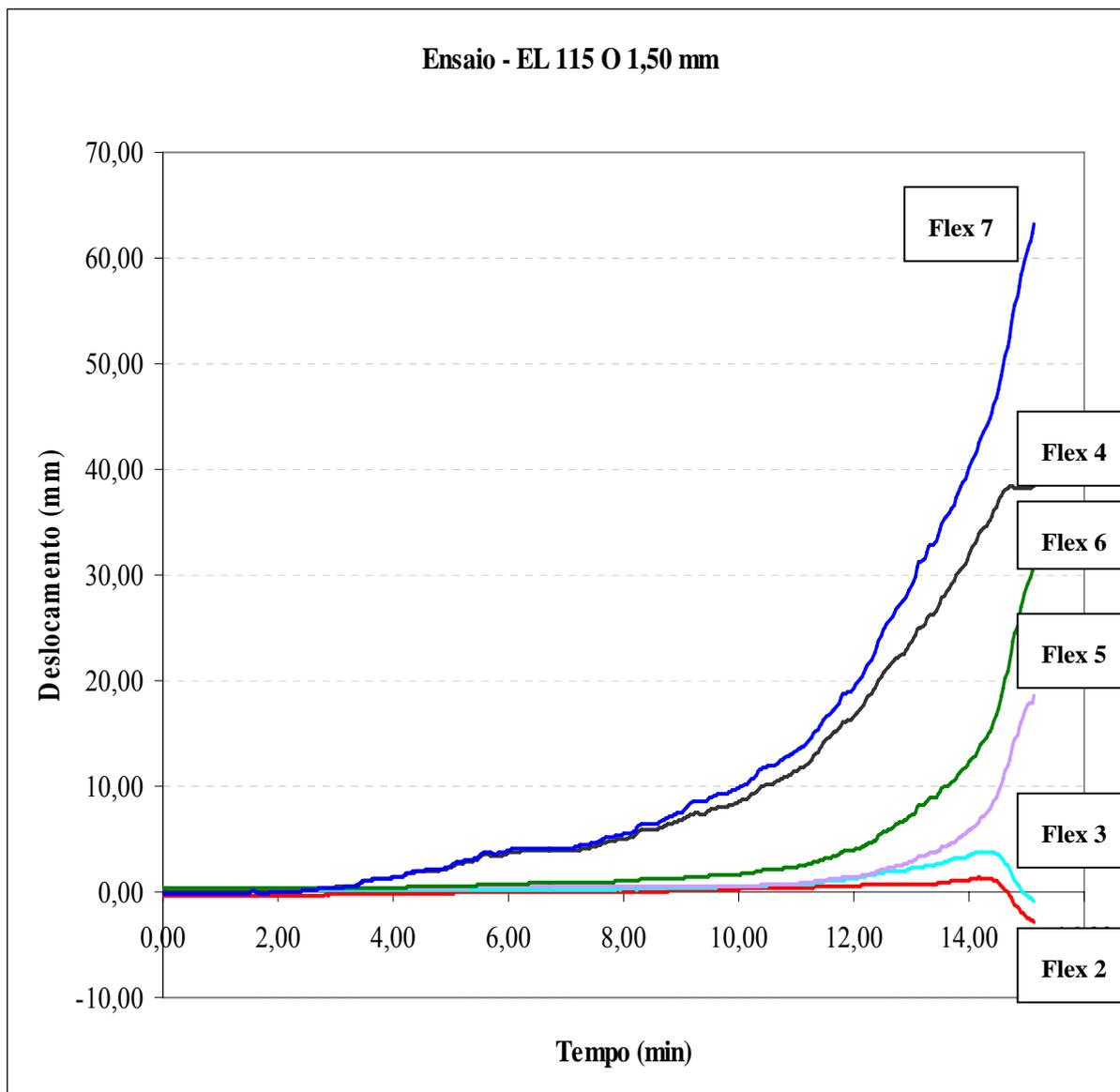


Gráfico 3 - Tempo x Deslocamento - EL 115 O 1,50 mm

III - Condições de apoio

As longarinas estavam engastadas nos montantes, ou seja, os deslocamentos de translação e rotação estavam impedidos, por meio de sistemas de garras conforme apresentada na foto 7.

Esses engastamentos foram projetados de maneira que não ocorresse o colapso nos mesmos, ou seja, eram resistentes o suficiente para que o colapso ocorresse por flexão ao longo da longarina.



Foto 7 - Longarina biengastada: 1 - Engaste; 2 - Montante.

IV - O colapso

Não ocorreu torção, o que já era esperado por se tratar de seção fechada.

A configuração descontínua das soldas de filete não evitou o esmagamento prematuro da mesa comprimida. Ocorreu esmagamento da mesa antes do esmagamento da alma.

Uma possível solução para aprimorar o comportamento e a resistência seria costurar com solda de filete na região das cargas concentradas. Dessa forma, seria possível analisar a ruptura esperada, esmagamento de alma.



Foto 8 - Esmagamento da mesa: 1 - Configuração de soldagem.

V - Esmagamento de Alma

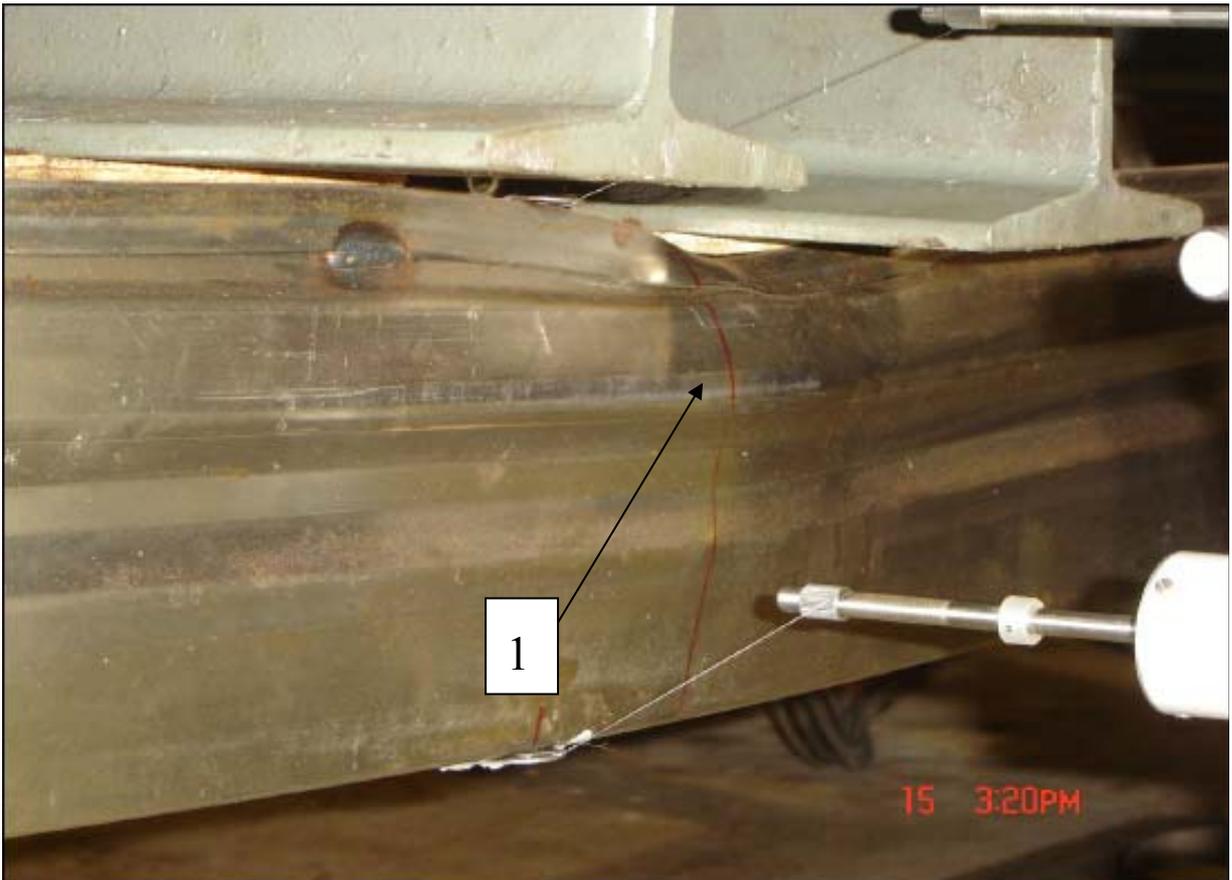


Foto 9 - Ruptura: 1 - Esmagamento de alma.

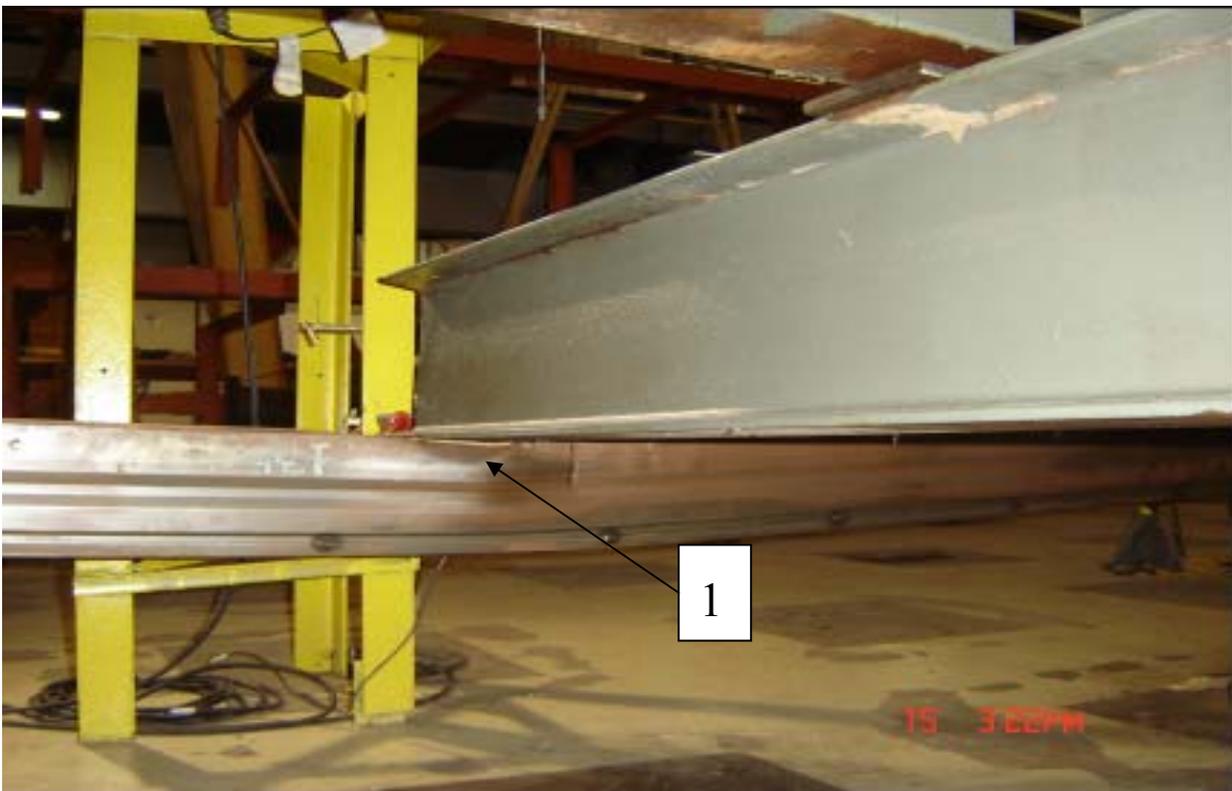


Foto 10 - Ruptura: 1 - Esmagamento de alma.

O gráfico 4 demonstra o maior deslocamento na direção vertical (flexímetro 7. No gráfico 4, flex 7) com o acréscimo de carga, caracterizando o colapso que se deu nessa direção.

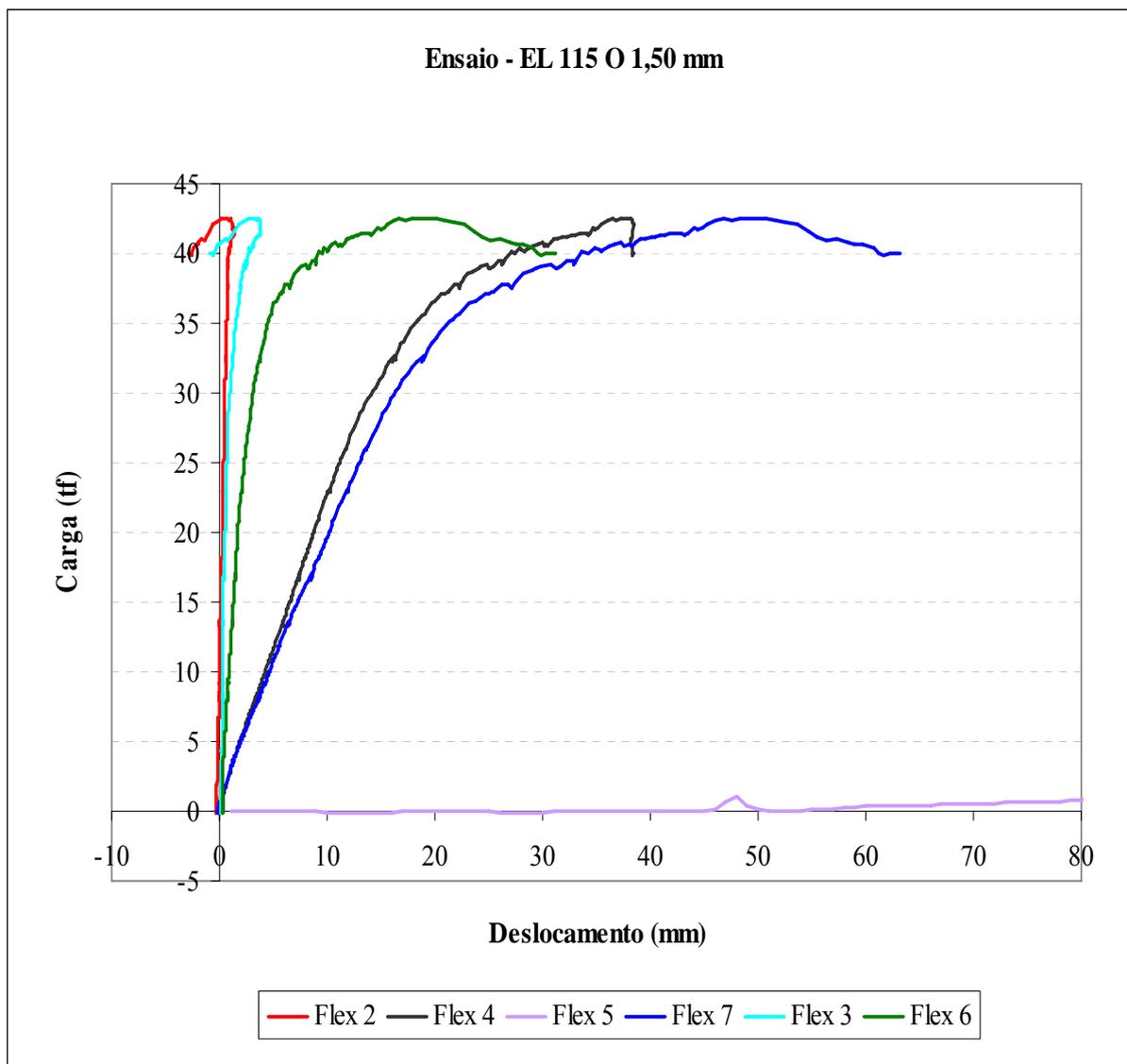


Gráfico 4 - Deslocamento x Carga - EL 115 C 1,50 mm

3 - Comparação e discussão dos resultados obtidos nas abordagens teórica e experimental para a análise de resistência das longarinas

3.1 - Longarina EL 115 C 1,50 mm

Os resultados apresentados na tabela 3 referem-se a uma das forças concentradas aplicadas na longarina.

Tabela 3 - Resultados obtidos na análise da EL 115 C 1,50 mm

EL 115 C 1,50 mm	Teórica		Experimental
Colapso	Início da Plastificação na seção do apoio	Esmagamento de Alma	Torção
Resistência	2365 N	10250 N	1414 N

$$\text{Torção: } F = 4 \times 1383 + (31.48 + 31.52 + 31.64 + 31.42) = 5658 \rightarrow 5658 / 4 = 1414 \text{ N}$$

Como se pode observar o ensaio apresenta resultado não esperado se comparado aos resultados teóricos. Isso se deve a alguns fatos:

1 - A consideração da aplicação de carga no centro de torção não é cumprida no experimento. Existe uma excentricidade da força concentrada na longarina. Então, há uma torção inicial aplicada na longarina. Sendo assim, a viga terá que resistir às forças concentradas aplicadas perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça e a um carregamento de torção, mudando assim o modelo estrutural adotado.

2 - Os cálculos utilizados para obtenção da resistência dessa longarina não são inteiramente aplicáveis, por se tratar de seção não qualificada em norma. Por isso, foi realizada uma série de aproximações.

Outros ensaios foram realizados para diferentes alturas de alma, e os resultados quanto ao colapso foram os mesmos, ou seja, torção.

3.2 - Longarina EL 115 O 1,50 mm

Os resultados apresentados na tabela 4 referem-se a uma das forças concentradas aplicadas na longarina.

Tabela 4 - Resultados obtidos na análise da EL 115 O 1,50 mm

EL 115 O 1,50 mm	Teórica		Experimental
Colapso	Início da Plastificação na seção do apoio	Esmagamento de Alma	Esmagamento da Mesa e da Alma
Resistência	5577 N	20310 N	5346 N

$$\text{Torção: } F = 4 \times 5314 + (31.48 + 31.52 + 31.64 + 31.42) = 21382 \rightarrow 21382 / 4 = 5346 \text{ N}$$

Como se pode observar o ensaio apresenta resultado não esperado se comparado aos resultados teóricos. Isso se deve a alguns fatos:

1 - Os cálculos foram realizados considerando uma seção fechada. Porém, os espaçamentos existentes entre dois pontos de soldagem configuram uma situação propícia para colapso de placa.

2 - Percebe-se também que o valor da resistência teórica para esmagamento de alma é muito superior ao valor encontrado no experimento. Isso ocorre porque a forma do perfil não se adequa perfeitamente as condições descritas no item F.1 no Anexo F da NBR 14762:2001 [1].

Outros ensaios foram realizados para diferentes alturas de alma, e os resultados quanto ao colapso foram os mesmos, ou seja, primeiramente esmagamento da mesa e logo após esmagamento da alma.

A solução proposta para que se pudesse minimizar as diferenças entre o modelo estrutural e o que realmente ocorreu, foi montar um ensaio onde os pontos de solda fossem mais próximos na mesa da peça, eliminando assim esse modo de colapso (esmagamento da mesa). A norma utilizada nessa análise não prevê esse modo de colapso para essas condições.

PARTE II - Análise de Resistência de Montantes

1 - Abordagem Teórica

1.1 - Montante EM 80 - 2,00 mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]

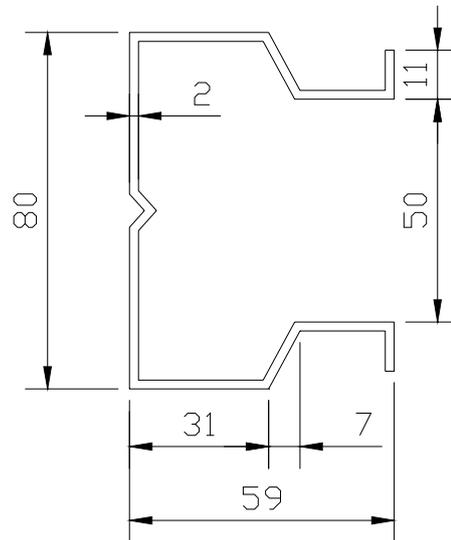


Figura 11 - Seção transversal do montante EM 80 - 2,00. Dimensões em mm

I - Propriedades do material

Aço SAE 1008

$E = 205000 \text{ MPa}$

$G = 78000 \text{ MPa}$

$f_y = 180 \text{ MPa}$ - no caso de aços sem qualificação estrutural, conforme item 4.2 da NBR 14762:2001[1], não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento.

II - Parâmetros referentes às condições de contorno do montante

II.1 - Parâmetros de flambagem na flexão para ambas extremidades rotuladas - k recomendado, conforme Anexo H da NBR 8800:2003[6]

$$K_x := 1$$

$$K_y := 1$$

II.2 - Parâmetro de flambagem na torção para ambas extremidades com rotação e empenamento impedidos

$$K_t := 0.5$$

III - Propriedades geométricas da seção bruta (extraídas do programa CUFSM, conforme ANEXO III.1.2)

$$L_{\text{local}} := 110 \text{ mm}$$

$$L := 3 \cdot L_{\text{local}} \quad L = 330 \text{ mm}$$

$$A_g := 464.6931 \text{ mm}^2$$

$$I_t := 619.5901 \text{ mm}^4$$

$$I_x := 413195.9483 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 201498.8467 \text{ mm}^4$$

$$C_w := 359127543.3238 \text{ mm}^6$$

$$x_{cg} := 21.4886 \text{ mm}$$

$$y_{cg} := 39 \text{ mm}$$

$$X_s := -29.5156 \text{ mm}$$

$$Y_s := 39 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$x_o := x_{cg} - X_s$$

$$y_o := y_{cg} - Y_s$$

$$r_x = 29.819 \text{ mm}$$

$$r_y = 20.823 \text{ mm}$$

$$x_o = 51.004 \text{ mm}$$

$$y_o = 0 \text{ mm}$$

$$r_o := \sqrt{(r_x^2) + (r_y^2) + (x_o^2) + (y_o^2)}$$

$$r_o = 62.644 \text{ mm}$$

1.1.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001 [1]): P_{cre}

I - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y: P_{ey}

$$P_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2}$$

$$P_{ey} = 3.744 \times 10^6 \text{ N}$$

II - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X: P_{ex}

$$P_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L)^2}$$

$$P_{ex} = 7.677 \times 10^6 \text{ N}$$

III - Força normal de flambagem elástica por torção: P_{et}

$$P_{et} := \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L)^2} + G \cdot I_t \right]$$

$$P_{et} = 6.813 \times 10^6 \text{ N}$$

IV - Força normal de flambagem elástica por flexo-torção: P_{ext}

$$P_{ext} := \frac{P_{et} + P_{ex}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot P_{ex} \cdot P_{et} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]}{(P_{ex} + P_{et})^2}} \right]$$

$$P_{ext} = 3.978 \times 10^6 \text{ N}$$

$$P_{cre} := \min(P_{ey}, P_{ex}, P_{et}, P_{ext})$$

$P_{cre} = 3.744 \times 10^6$ N - modo de flambagem global por flexão em relação ao eixo Y.

1.1.2 - Carga para início da plastificação da seção: P_y

$$P_y := F_y \cdot A_g$$

$$P_y = 8.364 \times 10^4 \text{ N}$$

1.1.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P_{cl}

$$P_{cl} / P_y = \text{fator local}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.1.3.

$$\text{fatorlocal} := 5.72$$

$$P_{cl} := \text{fatorlocal} \cdot P_y$$

$$P_{cl} = 4.784 \times 10^5 \text{ N}$$

1.1.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P_{cd}

$$P_{cd} / P_y = \text{fator distorcional}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.1.4.

$$\text{fatordist} := 2.88$$

$$P_{cd} := \text{fatordist} \cdot P_y$$

$$P_{cd} = 2.409 \times 10^5 \text{ N}$$

1.1.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI [2]): P_{ne}

$$\lambda_c := \left(\frac{P_y}{P_{cre}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_c = 0.149$$

$$P_{ne} := \begin{cases} \left[\left[0.658 (\lambda_c^2) \right] \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \\ \left[\left[\left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \cdot P_y \right] \right] & \text{if } \lambda_c > 1.5 \end{cases}$$

$$P_{ne} = 8.287 \times 10^4 \text{ N}$$

1.1.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: Pnl

$$\lambda_{\text{Local}} := \left(\frac{P_{ne}}{P_{cr1}} \right)^{0.5} \quad \lambda_{\text{Local}} = 0.416$$

$$P_{nl} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.15 \cdot \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \cdot P_{ne} \right] & \text{if } \lambda_{\text{Local}} > 0.776 \\ P_{ne} & \text{if } \lambda_{\text{Local}} \leq 0.776 \end{cases}$$

$$P_{nl} = 8.287 \times 10^4 \text{ N}$$

1.1.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: Pnd

$$\lambda_{\text{distorcional}} := \left(\frac{P_y}{P_{crd}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{distorcional}} = 0.589$$

$$P_{nd} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.25 \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} > 0.561 \\ P_y & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} \leq 0.561 \end{cases}$$

$$P_{nd} = 8.337 \times 10^4 \text{ N}$$

1.1.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal

$$P_n := \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$$

$$P_n = 8.287 \times 10^4 \text{ N} \quad \text{Modo Global}$$

1.1.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo

$$P_{\text{resistente}} = \Phi_b \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} = 0.85 \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} = 7.044 \times 10^4 \text{ N}$$

1.2 - Montante EM 80 - 2,65 mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]

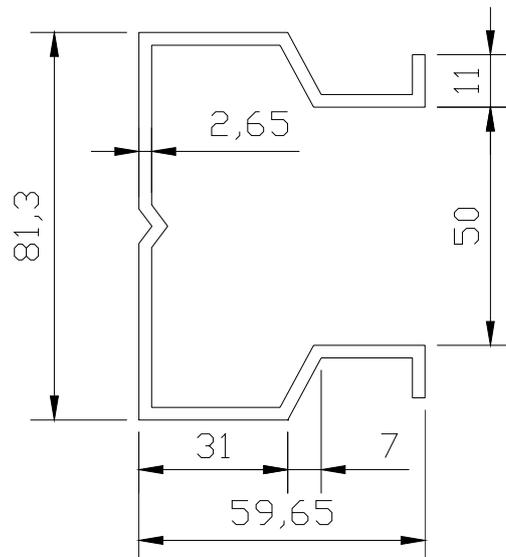


Figura 12 - Seção transversal do montante EM 80 - 2,65. Dimensões em mm

I - Propriedades do material

Aço SAE 1008

$E = 205000 \text{ MPa}$

$G = 78000 \text{ MPa}$

$f_y = 180 \text{ MPa}$ - no caso de aços sem qualificação estrutural, conforme item 4.2 da NBR 14762:2001 [1], não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento.

II - Parâmetros referentes às condições de contorno do montante

II.1 - Parâmetros de flambagem na flexão para ambas extremidades rotuladas - k recomendado, conforme Anexo H da NBR 8800:2003 [6]

$$K_x := 1$$

$$K_y := 1$$

II.2 - Parâmetro de flambagem na torção para ambas extremidades com rotação e empenamento impedidos

$$K_t := 0.5$$

III - Propriedades geométricas da seção bruta (extraídas do programa CUFSM, conforme ANEXO III.2.2)

$$L_{\text{local}} := 90 \text{ mm}$$

$$L := 3 \cdot L_{\text{local}}$$

$$L = 270 \text{ mm}$$

$$A_g := 615.0649 \text{ mm}^2$$

$$I_t := 1439.764 \text{ mm}^4$$

$$I_x := 553137.0455 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 265054.1936 \text{ mm}^4$$

$$C_w := 486288946.229 \text{ mm}^6$$

$$x_{cg} := 21.3859 \text{ mm}$$

$$y_{cg} := 39.325 \text{ mm}$$

$$X_s := -29.4864 \text{ mm}$$

$$Y_s := 39.325 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$x_o := x_{cg} - X_s$$

$$y_o := y_{cg} - Y_s$$

$$r_x = 29.989 \text{ mm}$$

$$r_y = 20.759 \text{ mm}$$

$$x_o = 50.872 \text{ mm}$$

$$y_o = 0$$

$$r_o := \sqrt{(r_x^2) + (r_y^2) + (x_o^2) + (y_o^2)}$$

$$r_o = 62.596 \text{ mm}$$

1.2.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001[1]): P_{cre}

I - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y: P_{ey}

$$P_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2}$$

$$P_{ey} = 7.356 \times 10^6 \text{ N}$$

II - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X: P_{ex}

$$P_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L)^2}$$

$$P_{ex} = 1.535 \times 10^7 \text{ N}$$

III - Força normal de flambagem elástica por torção: P_{et}

$$P_{et} := \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L)^2} + G \cdot I_t \right]$$

$$P_{et} = 1.381 \times 10^7 \text{ N}$$

IV - Força normal de flambagem elástica por flexo-torção: P_{ext}

$$P_{ext} := \frac{P_{et} + P_{ex}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot P_{ex} \cdot P_{et} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]}{(P_{ex} + P_{et})^2}} \right]$$

$$P_{ext} = 8.018 \times 10^6 \text{ N}$$

$$P_{cre} := \min(P_{ey}, P_{ex}, P_{et}, P_{ext})$$

$$P_{cre} = 7.356 \times 10^6 \text{ N} - \text{modo de flambagem global por flexão em relação ao eixo Y.}$$

1.2.2 - Carga para início da plastificação da seção: P_y

$$P_y := F_y \cdot A_g$$

$$P_y = 1.107 \times 10^5 \text{ N}$$

1.2.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P_{cr1}

$$P_{cr1} / P_y = \text{fator local}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.2.3.

$$\text{fatorlocal} := 7.75$$

$$P_{cr1} / P_y = \text{fator local}$$

$$P_{cr1} = 8.58 \times 10^5 \text{ N}$$

1.2.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P_{crd}

$$P_{crd} / P_y = \text{fator distorcional}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.2.4.

$$\text{fatordist} := 3.99$$

$$P_{crd} := \text{fatordist} \cdot P_y$$

$$P_{crd} = 4.417 \times 10^5 \text{ N}$$

1.2.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI[2]): P_{ne}

$$\lambda_c := \left(\frac{P_y}{P_{cre}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_c = 0.123$$

$$P_{ne} := \begin{cases} \left[\left[0.658 (\lambda_c^2) \right] \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \\ \left[\left[\left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \cdot P_y \right] \right] & \text{if } \lambda_c > 1.5 \end{cases}$$

$$P_{ne} = 1.1 \times 10^5 \text{ N}$$

1.2.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: Pnl

$$\lambda_{\text{Local}} := \left(\frac{P_{ne}}{P_{crl}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{Local}} = 0.358$$

$$P_{nl} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.15 \cdot \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \cdot P_{ne} \right] & \text{if } \lambda_{\text{Local}} > 0.776 \\ P_{ne} & \text{if } \lambda_{\text{Local}} \leq 0.776 \end{cases}$$

$$P_{nl} = 1.1 \times 10^5 \text{ N}$$

1.2.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: Pnd

$$\lambda_{\text{distorcional}} := \left(\frac{P_y}{P_{crd}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{distorcional}} = 0.501$$

$$P_{nd} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.25 \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} > 0.561 \\ P_y & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} \leq 0.561 \end{cases}$$

$$P_{nd} = 1.107 \times 10^5 \text{ N}$$

1.2.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal

$$P_n := \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$$

$$P_n = 1.1 \times 10^5 \text{ N} - \text{Modo Global}$$

1.2.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo

$$P_{\text{resistente}} = \Phi_b \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} := 0.85 \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} = 9.351 \times 10^4 \text{ N}$$

1.3 - Montante EM 100 - 2,00 mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]

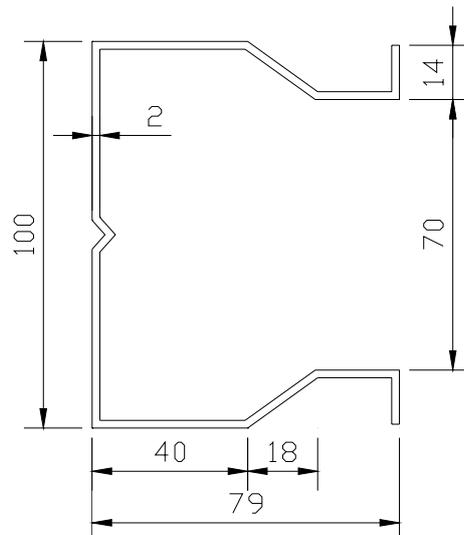


Figura 13 - Seção transversal do montante EM 100 - 2,00. Dimensões em mm

I - Propriedades do material

Aço SAE 1008

$E = 205000 \text{ MPa}$

$G = 78000 \text{ MPa}$

$f_y = 180 \text{ MPa}$ - no caso de aços sem qualificação estrutural, conforme item 4.2 da NBR 14762:2001 [1], não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento.

II - Parâmetros referentes às condições de contorno do montante

II.1 - Parâmetros de flambagem na flexão para ambas extremidades rotuladas - k recomendado, conforme Anexo H da NBR 8800:2003 [6]

$$K_x := 1$$

$$K_y := 1$$

II.2 - Parâmetro de flambagem na torção para ambas extremidades com rotação e empenamento impedidos

$$K_t := 0.5$$

III - Propriedades geométricas da seção bruta (extraídas do programa CUFSM, conforme ANEXO III.3.2)

$$L_{\text{local}} := 120 \text{ mm}$$

$$L := 3 \cdot L_{\text{local}}$$

$$L = 360 \text{ mm}$$

$$A_g := 578.0832 \text{ mm}^2$$

$$I_t := 770.7776 \text{ mm}^4$$

$$I_x := 865737.4715 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 472462.5424 \text{ mm}^4$$

$$C_w := 1137336399.00116 \text{ mm}^6$$

$$x_{cg} := 29.0169 \text{ mm}$$

$$y_{cg} := 48.5 \text{ mm}$$

$$X_s := -39.328$$

$$Y_s := 48.5$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$x_o := x_{cg} - X_s$$

$$y_o := y_{cg} - Y_s$$

$$r_x = 38.699 \text{ mm}$$

$$r_y = 28.588 \text{ mm}$$

$$x_o = 68.345 \text{ mm}$$

$$y_o = 0$$

$$r_o := \sqrt{(r_x^2) + (r_y^2) + (x_o^2) + (y_o^2)}$$

$$r_o = 83.582 \text{ mm}$$

1.3.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001 [1]): P_{cre}

I - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y: P_{ey}

$$P_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2}$$

$$P_{ey} = 7.376 \times 10^6 \text{ N}$$

II - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X: P_{ex}

$$P_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L)^2}$$

$$P_{ex} = 1.352 \times 10^7 \text{ N}$$

III - Força normal de flambagem elástica por torção: P_{et}

$$P_{et} := \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L)^2} + G \cdot I_t \right]$$

$$P_{et} = 1.018 \times 10^7 \text{ N}$$

IV - Força normal de flambagem elástica por flexo-torção: P_{ext}

$$P_{ext} := \frac{P_{et} + P_{ex}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot P_{ex} \cdot P_{et} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]}{(P_{ex} + P_{et})^2}} \right]$$

$$P_{ext} = 6.373 \times 10^6$$

$$P_{cre} := \min(P_{ey}, P_{ex}, P_{et}, P_{ext})$$

$$P_{cre} = 6.373 \times 10^6 \text{ N} - \text{modo de flambagem global por flexo-torção.}$$

1.3.2 - Carga para início da plastificação da seção: P_y

$$P_y := F_y \cdot A_g$$

$$P_y = 1.041 \times 10^5 \text{ N}$$

1.3.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P_{cr1}

$$P_{cr1} / P_y = \text{fator local}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.3.3.

$$\text{fatorlocal} := 3.59$$

$$P_{cr1} := \text{fatorlocal} \cdot P_y$$

$$P_{cr1} = 3.736 \times 10^5 \text{ N}$$

1.3.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P_{crd}

$$P_{crd} / P_y = \text{fator distorcional}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.3.4.

$$\text{fatordist} := 1.84$$

$$P_{crd} := \text{fatordist} \cdot P_y$$

$$P_{crd} = 1.915 \times 10^5 \text{ N}$$

1.3.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI [2]): P_{ne}

$$\lambda_c := \left(\frac{P_y}{P_{cre}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_c = 0.128$$

$$P_{ne} := \begin{cases} \left[\left[0.658 (\lambda_c^2) \right] \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \\ \left[\left[\left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \cdot P_y \right] \right] & \text{if } \lambda_c > 1.5 \end{cases}$$

$$P_{ne} = 1.033 \times 10^5 \text{ N}$$

1.3.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: Pnl

$$\lambda_{\text{Local}} := \left(\frac{P_{ne}}{P_{cr1}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{Local}} = 0.526$$

$$P_{nl} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.15 \cdot \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \cdot P_{ne} \right] & \text{if } \lambda_{\text{Local}} > 0.776 \\ P_{ne} & \text{if } \lambda_{\text{Local}} \leq 0.776 \end{cases}$$

$$P_{nl} = 1.033 \times 10^5 \text{ N}$$

1.3.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: Pnd

$$\lambda_{\text{distorcional}} := \left(\frac{P_y}{P_{crd}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{distorcional}} = 0.737$$

$$P_{nd} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.25 \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} > 0.561 \\ P_y & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} \leq 0.561 \end{cases}$$

$$P_{nd} = 9.595 \times 10^4 \text{ N}$$

1.3.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal

$$P_n := \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$$

$$P_n = 9.595 \times 10^4 \text{ N} - \text{Modo Distorcional}$$

1.3.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo

$$P_{\text{resistente}} = \Phi_b \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} := 0.85 \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} = 8.156 \times 10^4 \text{ N}$$

1.4 - Montante EM 100 - 2,65mm - Momento Resistente obtido pelo método da resistência direta - AISI [2]

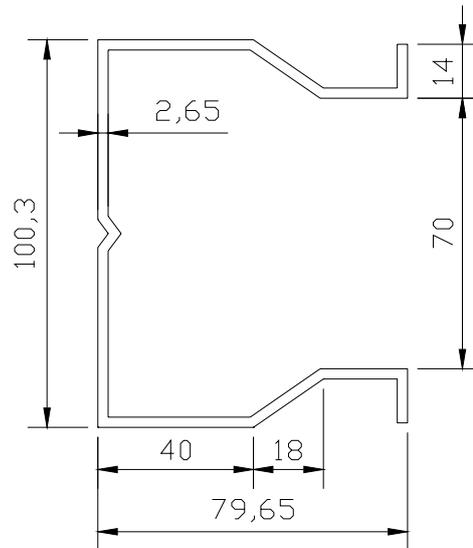


Figura 14 - Seção transversal do montante EM 100 - 2,65. Dimensões em mm

I - Propriedades do material

Aço SAE 1008

$E = 205000 \text{ MPa}$

$G = 78000 \text{ MPa}$

$f_y = 180 \text{ MPa}$ - no caso de aços sem qualificação estrutural, conforme item 4.2 da NBR 14762:2001[1], não devem ser adotados no projeto valores superiores a 180 MPa para a resistência ao escoamento.

II - Parâmetros referentes às condições de contorno do montante

II.1 - Parâmetros de flambagem na flexão para ambas extremidades rotuladas - k recomendado, conforme Anexo H da NBR 8800:2003 [6]

$$K_x := 1$$

$$K_y := 1$$

II.2 - Parâmetro de flambagem na torção para ambas extremidades com rotação e empenamento impedidos

$$K_t := 0.5$$

III - Propriedades geométricas da seção bruta (extraídas do programa CUFSM, conforme ANEXO III.4.2)

$$L_{\text{local}} := 100 \text{ mm}$$

$$L := 3 \cdot L_{\text{local}}$$

$$L = 300 \text{ mm}$$

$$A_g := 764.7819 \text{ mm}^2$$

$$I_t := 1790.227 \text{ mm}^4$$

$$I_x := 1155390.7591 \text{ mm}^4$$

$$I_y := 622532.0653 \text{ mm}^4$$

$$C_w := 1538668935.7934 \text{ mm}^6$$

$$x_{cg} := 28.9208 \text{ mm}$$

$$y_{cg} := 48.825 \text{ mm}$$

$$X_s := -39.3208 \text{ mm}$$

$$Y_s := 48.825 \text{ mm}$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$$

$$r_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$$

$$x_o := x_{cg} - X_s$$

$$y_o := y_{cg} - Y_s$$

$$r_x = 38.868 \text{ mm}$$

$$r_y = 28.531 \text{ mm}$$

$$x_o = 68.242 \text{ mm}$$

$$y_o = 0$$

$$r_o := \sqrt{(r_x^2) + (r_y^2) + (x_o^2) + (y_o^2)}$$

$$r_o = 83.556 \text{ mm}$$

1.4.1 - Cálculo da força normal crítica de flambagem elástica (conforme item 7.7.2 da NBR 14762:2001 [1]): P_{cre}

I - Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y: P_{ey}

$$P_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L)^2}$$

$$P_{ey} = 1.399 \times 10^7 \text{ N}$$

II – Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo X: P_{ex}

$$P_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L)^2}$$

$$P_{ex} = 2.597 \times 10^7 \text{ N}$$

III - Força normal de flambagem elástica por torção: P_{et}

$$P_{et} := \frac{1}{r_o^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L)^2} + G \cdot I_t \right]$$

$$P_{et} = 1.984 \times 10^7 \text{ N}$$

IV - Força normal de flambagem elástica por flexo-torção: P_{ext}

$$P_{ext} := \frac{P_{et} + P_{ex}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot P_{ex} \cdot P_{et} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]}{(P_{ex} + P_{et})^2}} \right]$$

$$P_{ext} = 1.236 \times 10^7 \text{ N}$$

$$P_{cre} := \min(P_{ey}, P_{ex}, P_{et}, P_{ext})$$

$$P_{cre} = 1.236 \times 10^7 \text{ N} - \text{modo de flambagem global por flexo-torção.}$$

1.4.2 - Carga para início da plastificação da seção: P_y

$$P_y := F_y \cdot A_g$$

$$P_y = 1.377 \times 10^5 \text{ N}$$

1.4.3 - Determinação da carga de flambagem elástica local: P_{cr1}

$$P_{cr1} / P_y = \text{fator local}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.4.3.

$$\text{fatorlocal} := 4.95$$

$$P_{cr1} / P_y = \text{fator local}$$

$$P_{cr1} = 6.814 \times 10^5 \text{ N}$$

1.4.4 - Determinação da carga de flambagem elástica distorcional: P_{crd}

$$P_{crd} / P_y = \text{fator distorcional}$$

O programa CUFSM fornece esse valor para o fator local no ANEXO III.4.4.

$$\text{fator dist} := 2.53$$

$$P_{crd} / P_y = \text{fator distorcional}$$

$$P_{crd} = 3.483 \times 10^5 \text{ N}$$

1.4.5 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção (item 1.2.1.1 da AISI [2]): P_{ne}

$$\lambda_c := \left(\frac{P_y}{P_{cre}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_c = 0.106$$

$$P_{ne} := \begin{cases} \left[\left[0.658 (\lambda_c^2) \right] \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \\ \left[\left[\left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \right] \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c > 1.5 \end{cases}$$

$$P_{ne} = 1.37 \times 10^5 \text{ N}$$

1.4.6 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem local: Pnl

$$\lambda_{\text{Local}} := \left(\frac{P_{ne}}{P_{cr1}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{Local}} = 0.448$$

$$P_{nl} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.15 \cdot \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \cdot P_{ne} \right] & \text{if } \lambda_{\text{Local}} > 0.776 \\ P_{ne} & \text{if } \lambda_{\text{Local}} \leq 0.776 \end{cases}$$

$$P_{nl} = 1.37 \times 10^5 \text{ N}$$

1.4.7 - Determinação da força normal de compressão resistente nominal para flambagem distorcional: Pnd

$$\lambda_{\text{distorcional}} := \left(\frac{P_y}{P_{crd}} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_{\text{distorcional}} = 0.629$$

$$P_{nd} := \begin{cases} \left[\left[1 - 0.25 \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} > 0.561 \\ P_y & \text{if } \lambda_{\text{distorcional}} \leq 0.561 \end{cases}$$

$$P_{nd} = 1.354 \times 10^5 \text{ N}$$

1.4.8 - Valor da força normal de compressão resistente nominal

$$P_n := \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$$

$$P_n = 1.354 \times 10^5 \text{ N} - \text{Modo Distorcional}$$

1.4.9 - Valor da força normal de compressão resistente de cálculo

$$P_{\text{resistente}} = \Phi_b \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} := 0.85 \cdot P_n$$

$$P_{\text{resistente}} = 1.151 \times 10^5 \text{ N}$$

2 - Abordagem Experimental

I - Preparação dos ensaios de compressão centrada

Os ensaios dos montantes foram realizados por técnicos do Laboratório de Estruturas (LABEST) na placa de reação da COPPE/UFRJ e supervisionados pelo Professor Eduardo Batista e pela Professora Elaine Garrido Vazquez.

Foram devidamente marcados o centro de gravidade das mesas superior e inferior da prensa. Cada corpo de prova recebeu em suas extremidades uma chapa de aço. A centragem de cada corpo de prova nessa chapa foi realizada com auxílio de papel milimetrado: (i) cada extremidade do corpo de prova foi reproduzida em papel milimetrado; (ii) cada vértice do desenho foi lançado no programa CUFISM; (iii) este forneceu o centro de gravidade de cada extremidade do corpo de prova; (iv) o centro de gravidade foi marcado em papel milimetrado; (v) cada folha de papel milimetrado foi colada nas chapas de extremidade superior e inferior; (vi) a soldagem dos perfis na chapa seguia o desenho. Assim, através das chapas de aço foi possível coincidir o centro das mesas da prensa com o centro de gravidade de cada extremidade do corpo de prova, através de ajuste manual. Dessa forma, o perfil foi submetido à compressão centrada.

A leitura da carga última foi realizada através do dinamômetro da própria prensa. Os apoios eram bi-rotulados, materializados por duas rótulas esféricas de aço inox.



Foto 11 - Centragem dos corpos nas chapas de extremidade.

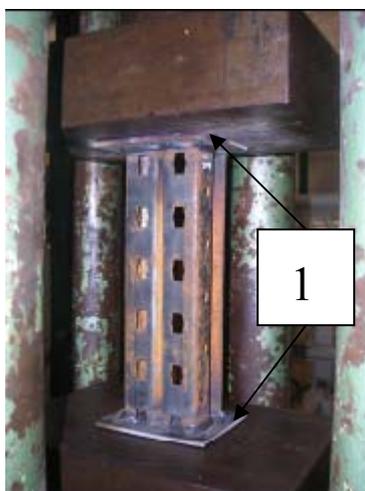


Foto 12 - Posicionamento dos corpos de prova na prensa: 1- Centro de gravidade das extremidades do perfil coincide com o eixo de carregamento da máquina.



Foto 13 - Leitura da carga última: 1 - Leitura da carga última dos montantes no dinamômetro.

II - Objetivo do ensaio

Esses montantes são usados juntamente com as longarinas, verificadas anteriormente, para formarem uma estrutura capaz de suportar os materiais a serem armazenados.

A verificação da resistência à compressão centrada desses perfis é realizada conforme cálculos anteriores. Porém, essas seções não são pré-qualificadas - Método da Resistência Direta - na norma americana AISI [2], e, além disso, essa norma considera a seção cheia dos perfis (sem furos). Sendo assim, para verificar a adequação desses cálculos na análise de resistência de perfis com furos e sem furos se faz necessário também a utilização de experimentos. Ou seja, os ensaios verificarão a flambagem de seções não definidas em norma e a influência dos furos na resistência a compressão centrada desses perfis.

Para tanto, foram utilizados três corpos de prova com furo e mais três sem furo para cada tipo de altura da alma e espessura do montante.

2.1 - Ensaio dos Montantes EM 100 - 2,00 mm



(a)



(b)



(c)

Foto 14 - EM 100 - 2,00 com furo. (a) CP 1; (b) CP 2 e (c) CP 3.



(a)



(b)



(c)

Foto 15 - EM 100 - 2,00 sem furo. (a) CP 4; (b) CP 5 e (c) CP 6.

2.2 - Ensaio dos Montantes EM 100 - 2,65 mm



(a)



(b)



(c)

Foto 16 - EM 100 - 2,65 com furo. (a) CP 7; (b) CP 8 e (c) CP 9.



(a)



(b)



(c)

Foto 17 - EM 100 - 2,65 sem furo. (a) CP 10; (b) CP 11 e (c) CP 12.

2.3 - Ensaio dos Montantes EM 80 - 2,00 mm



(a)



(b)



(c)

Foto 18 - EM 80 - 2,00 com furo. (a) CP 13; (b) CP 14 e (c) CP 15.



(a)



(b)



(c)

Foto 19 - EM 80 - 2,00 sem furo. (a) CP 16; (b) CP 17 e (c) CP 18.

2.4 - Ensaio dos Montantes EM 80 - 2,65 mm



Foto 20 - EM 80 - 2,65 com furo. (a) CP 19; (b) CP 20 e (c) CP 21.

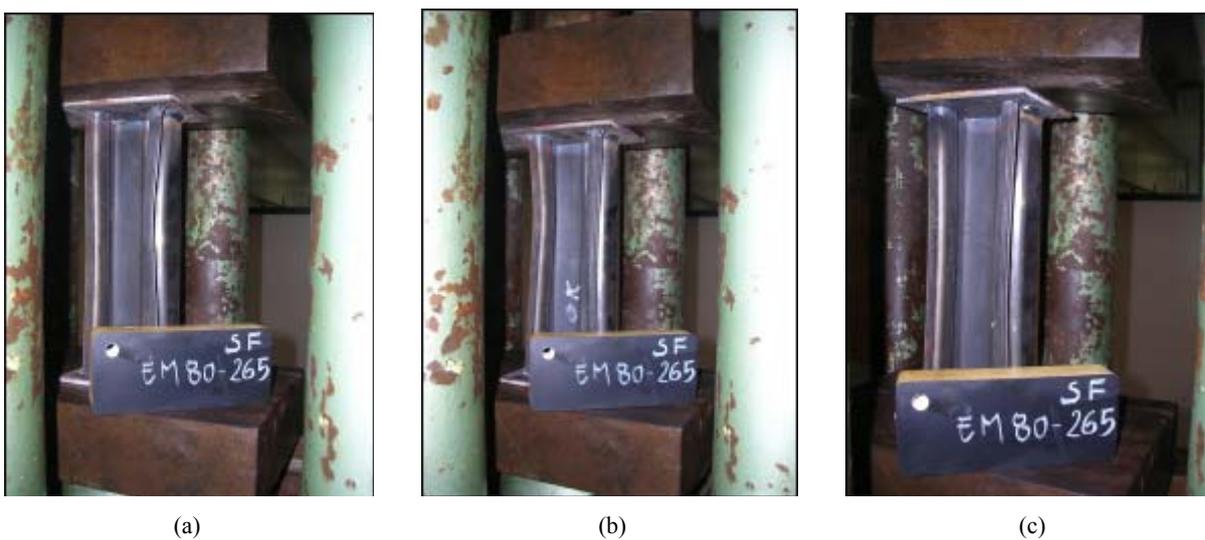


Foto 21 - EM 80 - 2,65 sem furo. (a) CP 22; (b) CP 23 e (c) CP 24.

3 - Comparação e discussão dos resultados obtidos nas abordagens teórica e experimental para a análise de resistência dos montantes

3.1 - Resultados do ensaio de caracterização do aço

De acordo com informações do fabricante, os aços fornecidos são de característica não estrutural - SAE 1008.

Os ensaios de caracterização do material foram desenvolvidos no Laboratório de Propriedades Mecânicas do programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de caracterização do aço

Amostra	Corpos de Prova	Tensão de Escoamento - MPa	Tensão limite de resistência - MPa	Deformação total (%)
Chapa 2,0 mm	1 longitudinal	320	408	32
	3 transversal	325	408	31
	4 transversal	320	409	31
Chapa 2,0 mm	2 longitudinal	320	408	33
	4 transversal	330	409	32
Chapa 2,65 mm	2 longitudinal	263	368	38
	3 transversal	270	367	38
	4 transversal	275	365	36
Chapa 2,65 mm	1 longitudinal	275	365	37
	3 transversal	285	364	37

Tabela 6 - Tensão de escoamento característica

						Desvio Padrão	Tensão Média	Tensão de escoamento característica - MPa *
Chapa 2,00 mm	320	325	320	320	330	4,47	321,25	314
Chapa 2,65 mm	263	270	275	275	285	8,05	273,60	260

* $f_k = f_m - 1,64\sigma$, onde: $f_k \Rightarrow$ tensão de escoamento característica; $f_m \Rightarrow$ tensão de escoamento média; $\sigma =$ desvio padrão.

3.2 - Flambagem e resistência dos montantes

Os comprimentos dos corpos de prova foram tomados como três vezes meio comprimento de onda no modo local de placa.

Os mesmos procedimentos de cálculo da resistência à compressão dos montantes (adotando $F_y = 180$ MPa) foram realizados para o cálculo da resistência à compressão dos montantes admitindo a tensão de escoamento real, de acordo com: (a) chapa 2,00 mm $\rightarrow F_y = 314$ MPa; (b) chapa 2,65 mm $\rightarrow F_y = 260$ MPa. Obteve-se dessa forma os valores de $P_{n\text{teórico}}$ para F_y real.

Observando a tabela a seguir, percebe-se que houve aumento da resistência à compressão comparado aos resultados obtidos com $F_y = 180$ MPa, o que já era esperado. Os modos de flambagem permanecem os mesmos.

Percebe-se, também, que os valores da resistência à compressão obtidos nos experimentos são muito superiores aos valores encontrados na análise teórica para $F_y = 180$ MPa. Isso ocorre porque a tensão de escoamento adotada na análise teórica é muito inferior à tensão de escoamento real do aço desses perfis. Já para os resultados teóricos calculados com a tensão de escoamento real ocorre pouca diferença em relação aos resultados experimentais.

Observando ainda a tabela 7, percebe-se que para os perfis mais esbeltos ensaiados, ou seja, os EM80-200 e EM 80-265, os modos de flambagem previstos pela análise teórica são discordantes dos modos de flambagem que experimentais. Isso confirma a exigência das normas de dimensionamento de estruturas constituídas de perfis formados a frio: para seções não previstas em norma é necessário um tratamento experimental, pois as expressões de cálculo existentes foram calibradas apenas para determinados tipos de seções.

Tabela 7 - Resultados obtidos nas análises dos montantes

Corpo de Prova		Comp	Pn teórico	Modo de	Pn teórico	Modo de	Pn	Modo de	
		(mm)	(kN) $F_y = 180$ MPa	Flambagem teórico	(kN) F_y real	Flambagem teórico	exp (kN)	Flambagem experimental	
CP1	EM100-200 com furo	361	96	Distorcional	$F_y = 314$ MPa	167	Distorcional	115	Distorcional
CP2	EM100-200 com furo	361	96	Distorcional		167	Distorcional	119	Distorcional
CP3	EM100-200 com furo	361	96	Distorcional		167	Distorcional	120	Distorcional
CP4	EM100-200 sem furo	363	96	Distorcional		167	Distorcional	151	Distorcional
CP5	EM100-200 sem furo	360	96	Distorcional		167	Distorcional	189	Distorcional
CP6	EM100-200 sem furo	362	96	Distorcional		167	Distorcional	170	Distorcional
CP7	EM100-265 com furo	302	135	Distorcional	$F_y = 260$ MPa	196	Distorcional	157	Distorcional
CP8	EM100-265 com furo	300	135	Distorcional		196	Distorcional	150	Distorcional
CP9	EM100-265 com furo	301	135	Distorcional		196	Distorcional	147	Distorcional
CP10	EM100-265 sem furo	300	135	Distorcional		196	Distorcional	273	Distorcional
CP11	EM100-265 sem furo	301	135	Distorcional		196	Distorcional	292	Distorcional
CP12	EM100-265 sem furo	300	135	Distorcional		196	Distorcional	264	Distorcional
CP13	EM80-200 com furo	330	82,9	Global	$F_y = 314$ MPa	144	Global	110	Distorcional
CP14	EM80-200 com furo	331	82,9	Global		144	Global	108	Distorcional
CP15	EM80-200 com furo	330	82,9	Global		144	Global	105	Distorcional
CP16	EM80-200 sem furo	330	82,9	Global		144	Global	135	Distorcional
CP17	EM80-200 sem furo	331	82,9	Global		144	Global	131	Distorcional
CP18	EM80-200 sem furo	331	82,9	Global		144	Global	131	Distorcional
CP19	EM80-265 com furo	271	110	Global	$F_y = 260$ MPa	159	Global	153	Distorcional
CP20	EM80-265 com furo	271	110	Global		159	Global	162	Distorcional
CP21	EM80-265 com furo	271	110	Global		159	Global	160	Distorcional
CP22	EM80-265 sem furo	270	110	Global		159	Global	210	Distorcional
CP23	EM80-265 sem furo	273	110	Global		159	Global	206	Distorcional
CP24	EM80-265 sem furo	272	110	Global		159	Global	218	Distorcional

3.3 - Influência dos furos

A influência dos furos na resistência à compressão desses perfis será obtida através do método de área efetiva (A_e) calculada conforme a norma americana, item 4.2.3 da Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks [7].

$$A_e = \left[1 - (1 - Q) \left(\frac{F_n}{F_y} \right)^Q \right] A_{net\ min}$$

O fator Q é calculado conforme item 9.2.2 da norma citada acima.

$$Q = \frac{\text{ultimate compressive strength of stub column by test}}{F_y A_{net\ min}}$$

A tensão de escoamento utilizada para cálculo da área efetiva é a real do aço.

Quanto ao valor $A_{net\ min}$, área mínima, trata-se da área nominal da seção cheia subtraída da área dos furos. Entendo-se como área de furos a pior situação para perda de área, ou seja, corresponde ao plano que corta perpendicularmente o eixo longitudinal do perfil na maior quantidade de furos, conforme tabela 9 apresentada a seguir.

Quanto ao valor da resistência teórica da coluna curta, F_n , foram usados os valores de resistência à compressão centrada (a tensão de escoamento é a real do aço) dividida pela área nominal da seção cheia, conforme tabela 10 apresentada a seguir.

Tabela 8 - Resistência à compressão centrada teórica e de ensaio para perfis com furos

Corpo de Prova		Fy	Comp (mm)	Pn teórica (kN)	Pn exp (kN)
CP1	EM100-200 com furo	314	361	167	115
CP2	EM100-200 com furo	314	361	167	119
CP3	EM100-200 com furo	314	361	167	120
CP7	EM100-265 com furo	260	302	196	157
CP8	EM100-265 com furo	260	300	196	150
CP9	EM100-265 com furo	260	301	196	147
CP13	EM80-200 com furo	314	330	144	110
CP14	EM80-200 com furo	314	331	144	108
CP15	EM80-200 com furo	314	330	144	105
CP19	EM80-265 com furo	260	271	159	153
CP20	EM80-265 com furo	260	271	159	162
CP21	EM80-265 com furo	260	271	159	160

Tabela 9 - Área nominal (A_g) e área mínima (A_{netmin})

Corpo de Prova		A_g	A_{netmin}^*	A_{netmin} / A_g
CP1	EM100-200 com furo	578,08	506,08	0,88
CP2	EM100-200 com furo	578,08	506,08	0,88
CP3	EM100-200 com furo	578,08	506,08	0,88
CP7	EM100-265 com furo	764,78	669,38	0,88
CP8	EM100-265 com furo	764,78	669,38	0,88
CP9	EM100-265 com furo	764,78	669,38	0,88
CP13	EM80-200 com furo	464,69	392,69	0,85
CP14	EM80-200 com furo	464,69	392,69	0,85
CP15	EM80-200 com furo	464,69	392,69	0,85
CP19	EM80-265 com furo	615,06	519,66	0,84
CP20	EM80-265 com furo	615,06	519,66	0,84
CP21	EM80-265 com furo	615,06	519,66	0,84

* O plano que corta perpendicularmente o maior número de furos ao longo do comprimento de qualquer montante contém quatro furos de diâmetro igual a 9 mm. Sendo assim, se obtém a área mínima: $A_{netmin} = A_g - (4 \times 9 \times \text{espessura})$.

Tabela 10 - Fator Q e Área efetiva (A_e)

CP	Área efetiva		Área Efetiva / Área Teórica	Média*
	$Q = Pn_{exp} / Fy \cdot A_{netmin}$	$Ae = (1 - (1 - Q) \cdot (Fn / Fy)^Q) \cdot A_{netmin}$		
CP1	0,72	374,429	0,65	0,66
CP2	0,75	386,673	0,67	
CP3	0,76	389,726	0,67	
CP7	0,90	604,692	0,79	0,76
CP8	0,86	578,064	0,76	
CP9	0,84	566,642	0,74	
CP13	0,89	350,815	0,75	0,74
CP14	0,88	344,509	0,74	
CP15	0,85	335,047	0,72	
CP19	1,13	588,015	0,96	0,99
CP20	1,20	622,366	1,01	
CP21	1,18	614,735	1,00	

* Esta é a redução que será utilizada para cálculo da resistência à compressão dos perfis afetada pela presença dos furos.

A resistência à compressão dos perfis de aço formados a frio influenciada pela existência dos furos é calculada por:

$$Pn_{RMI} = (A_{ef} / A) \times A \times Fy$$

Tabela 11 - Redução da resistência à compressão devido aos furos

Montante	Redução	Área	Fy	Pn _{RMI}	Pn _{exp}
		(mm ²)	(MPa)	(kN)	(kN)
EM100-200 com furo	0,66	578,1	180	68,7	118,0
EM100-265 com furo	0,76	764,8	180	104,6	151,3
EM80-200 com furo	0,74	464,7	180	61,9	107,7
EM80-265 com furo	0,99	615,1	180	109,6	158,3

Considerando:

- Área - área nominal de cada tipo de montante;
- Pn_{RMI} é a resistência à compressão dos perfis de aço levando em consideração os furos, conforme Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks - RMI [7];
- Pn_{exp} - média das cargas últimas (obtidas nos ensaios) de três a três corpos de prova dos montantes.

**Tabela 12 - Comparação das resistências à compressão
para perfis com furos e sem furos**

Montante	Pn teórico (kN)	Pn teórico (kN)	Pn com furo / Pn sem furo
	AISI	RMI	
EM100-200 com furo	xxxx	68,7	0,72
EM100-200 sem furo	96,0	xxxx	
EM100-265 com furo	xxxx	104,6	0,77
EM100-265 sem furo	135,0	xxxx	
EM80-200 com furo	xxxx	61,9	0,75
EM80-200 sem furo	82,9	xxxx	
EM80-265 com furo	xxxx	109,6	1,00
EM80-265 sem furo	110,0	xxxx	

Observando as áreas efetivas, conforme tabela 10, conclui-se que a presença de furação nas paredes de perfis formados a frio reduz a resistência à compressão, sendo absolutamente necessária a verificação da resistência com auxílio dos ensaios experimentais.

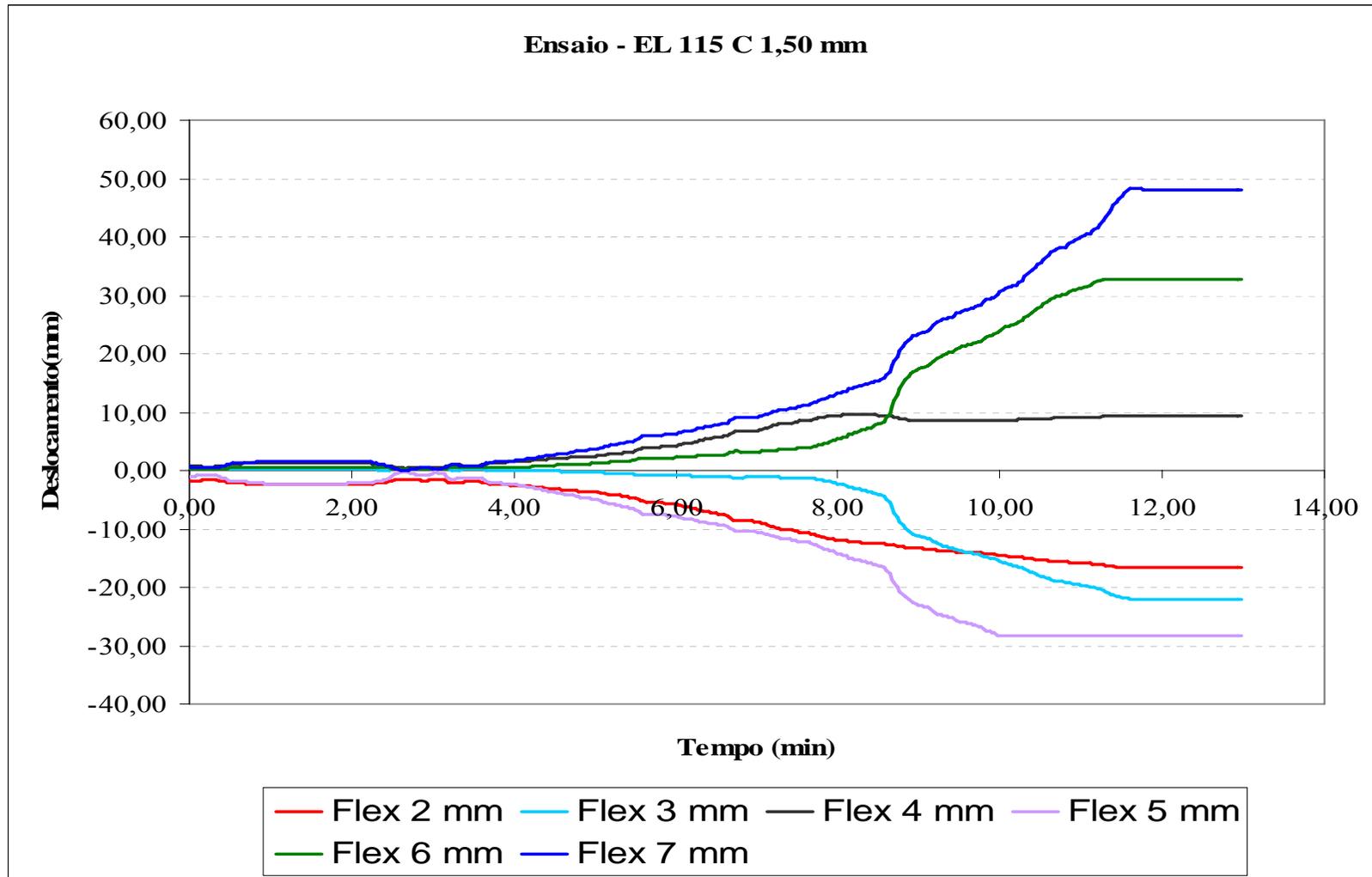
Conclusões

- A análise experimental de perfis formados a frio submetidos a ações de compressão e flexão é indispensável quando as seções não são previstas nas normas utilizadas para verificação estrutural.
- É importante também a análise experimental na verificação de perfis formados a frio, pois existem modos de colapso ainda não bem definido em norma, principalmente no caso de seções não usuais, como nos exemplos estudados nesse trabalho.
- A tensão de escoamento fixada por norma para aços não estruturais pode conduzir a importante discordância entre os resultados teóricos e experimentais. E ainda, a limitação da tensão de escoamento para aços não estruturais provoca ganho na segurança, pois as resistências calculadas são bem inferiores às reais, em detrimento da perda de economia.
- O uso de ensaios para comprovar a resistência superior de aços não estruturais, também acarretaria em perda de economia, pois seriam necessários ensaios de caracterização do material para cada bobina de aço que chegasse a fábrica, dada a imprevisibilidade das suas características.
- No caso estudado, a presença de furos foi julgada relevante na consideração de perda de resistência à compressão centrada de perfis formados a frio.

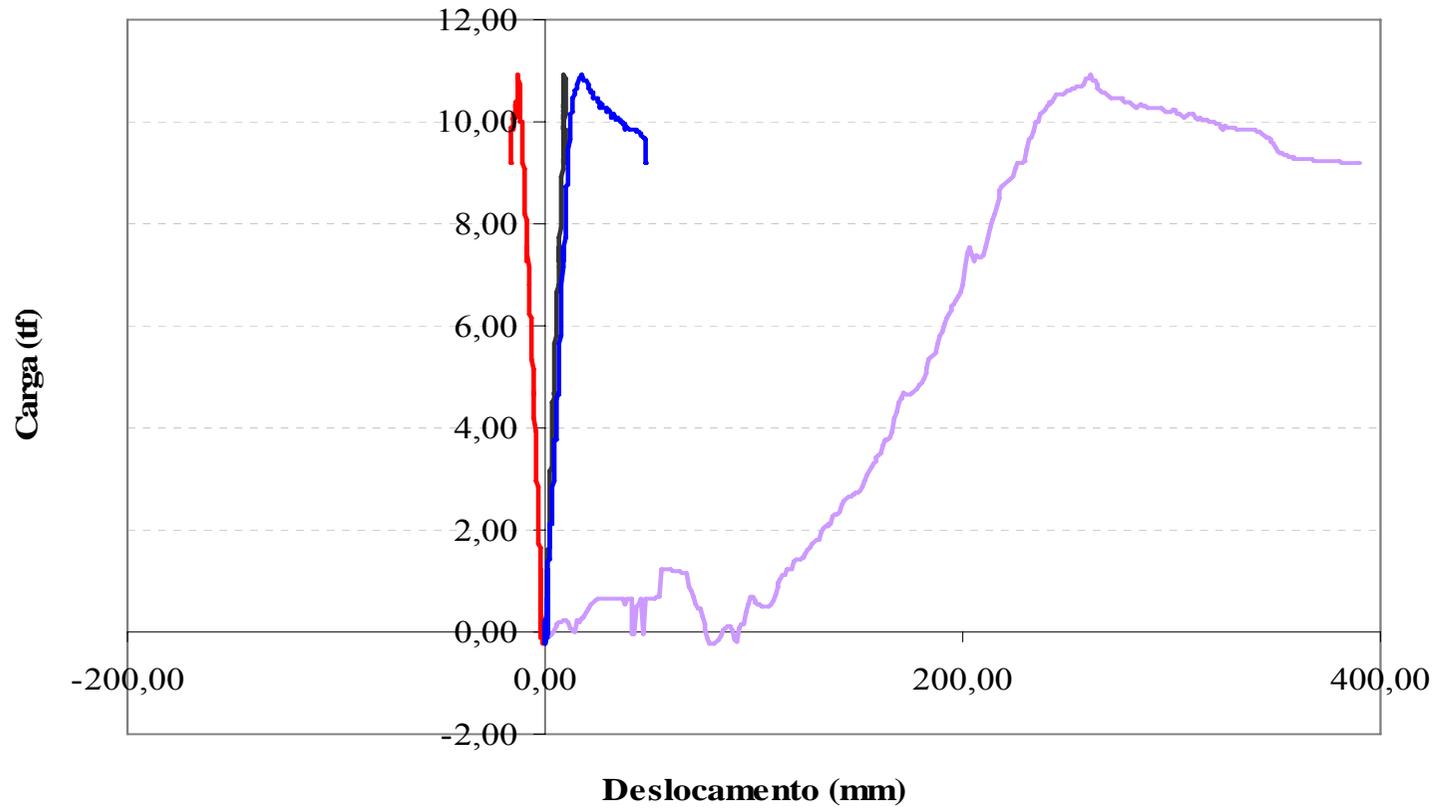
ANEXO I - Ensaio das Longarinas

I.1 - Longarina aberta – EL 115 C 1,50 mm

Flex - flexímetros, conforme foto 2; Carga T - carga aplicada no tempo, somando os dois atuadores hidráulicos.



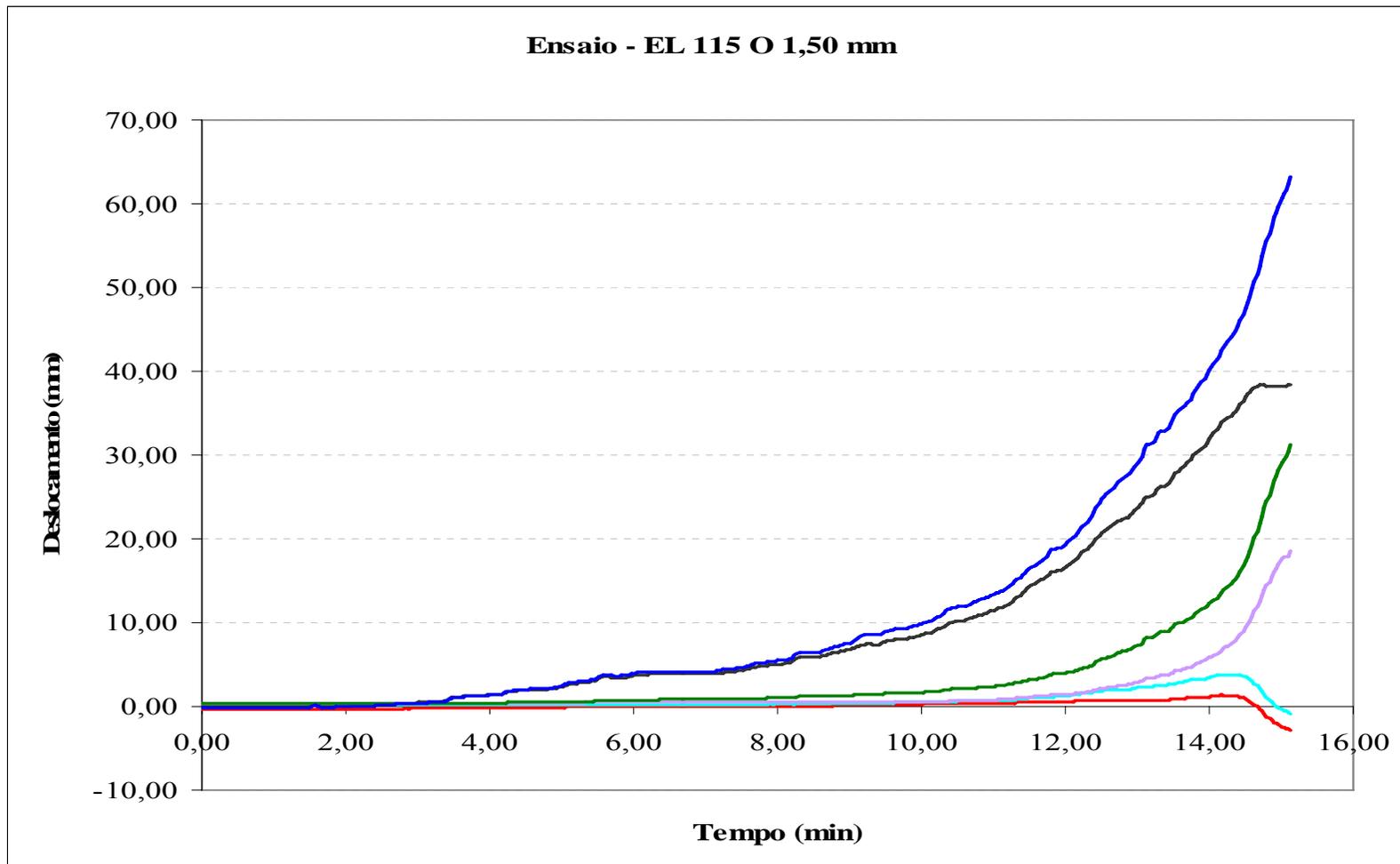
Ensaio - EL 115 C 1,50 mm



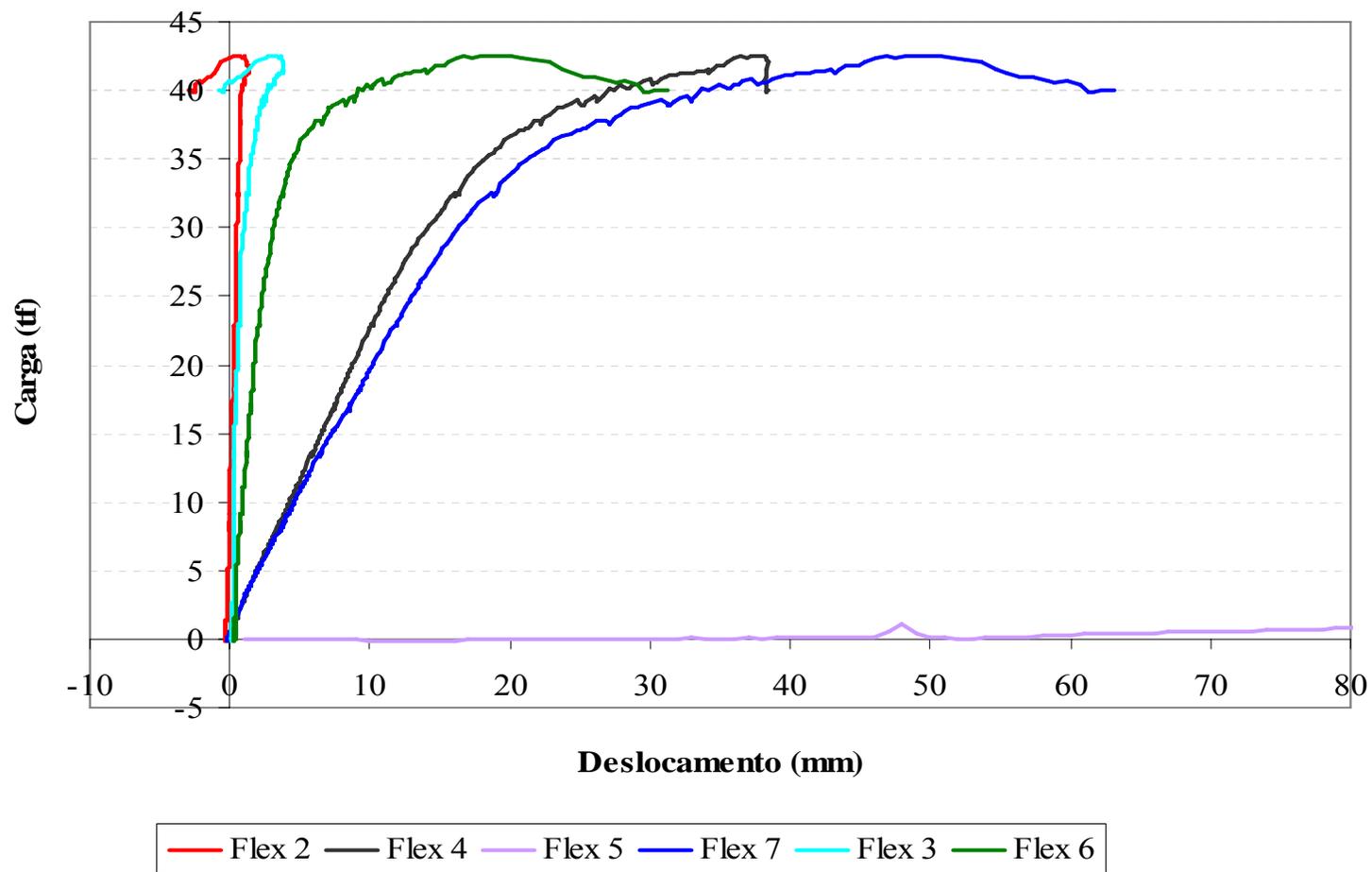
— Flex 2 — Flex 4 — Flex 5 — Flex 7

I.2 - Longarina fechada - EL 115 O 1,50 mm

Flex - flexímetros, conforme foto 6; Carga T - carga aplicada no tempo, somando os dois atuadores hidráulicos.



Ensaio - EL 115 O 1,50 mm



ANEXO II - Análise das longarinas no programa CUFSM v3.12

II.1 - Longarina aberta – EL 115 C 1,50 mm.

II.1.1 - Entrada do tipo do material, coordenadas dos nós e espessura.

Load Save Input Properties Analyze Post Z R Print Copy Reset ? X

Material Properties ?

mat#	Ex	Ey	vx	vy	Gxy
100	205000.00	205000.00	0.30	0.30	78000.00

Nodes ?

node#	x	z	xdof	zdof	ydof	qdof	stress
1	39.50	10.00	1	1	1	1	-147.12
2	39.50	0.00	1	1	1	1	-180.00
3	27.95	0.00	1	1	1	1	-179.89
4	16.23	0.00	1	1	1	1	-179.78
5	4.50	0.00	1	1	1	1	-179.68
6	4.50	10.00	1	1	1	1	-146.79
7	0.00	15.00	1	1	1	1	-130.31
8	0.00	23.00	1	1	1	1	-104.00

Elements ?

elem#	nodei	nodej	thickness	mat#
1	1	2	1.500000	100
2	2	3	1.500000	100
3	3	4	1.500000	100
4	4	5	1.500000	100
5	5	6	1.500000	100
6	6	7	1.500000	100
7	7	8	1.500000	100

Update Plot

Plot Options:

- node #
- elemen...
- materia...
- stress ...
- stress ...
- coordin...
- constr...
- springs
- origin

C/Z Template

Double Elem.

Divide Elem.

Delete Elem.

Trans. Node

Length: 2320.0 2330.0 2340.0 2350.0 2360.0 2370.0 2380.0 2390.0 2400.0 2410.0 2420.0 2430.0 2440.0 2450.0 2460.0 2470.0 2480.0 2490.0 2500.0

Springs ?

node#	DOF(x=1,z=2,y=3,theta=4)	kspring	kflag
0			

General Constraints Master-Sla... ?

node#e	DOFe	coeff.	node#k	DOFk
0				

cFSM Basis for cFSM View ?

On/Off

- Global 0
- Dist. 0
- Local 0
- Other 0

Natural modes

Axial m...

II.1.2 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado. **Correspondente ao momento positivo (meio do vão).**

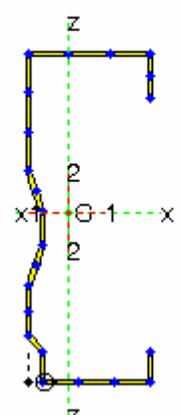
Load Save Input Properties Analyze Post Z R Print Copy Reset ? X

Calculated Section Properties

A = 312.3607	J = 234.2705
xcg 12.915	zcg = 54.6646
xx̄ = 547148.1324	lzz = 67807.5291
xz = 191.349	θ = -0.022872
I1 = 547148.2088	I22 = 67807.4527

Open Section Properties

Xs = -16.4001	Zs = 61.7
Cw 160775671.3931	274
β1 = -16.3656	Basic Pl... ω scale = 1
β2 = 112.3039	warping text out



Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

Moments consider Unsymmet... Restrained Bending

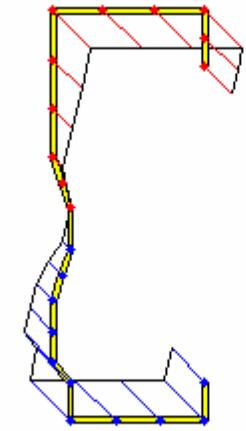
Generate P and M based on max (yield) 180

Bimoment based on T = 0 stress = 100 x = 50

Calculate P, M and B ? !

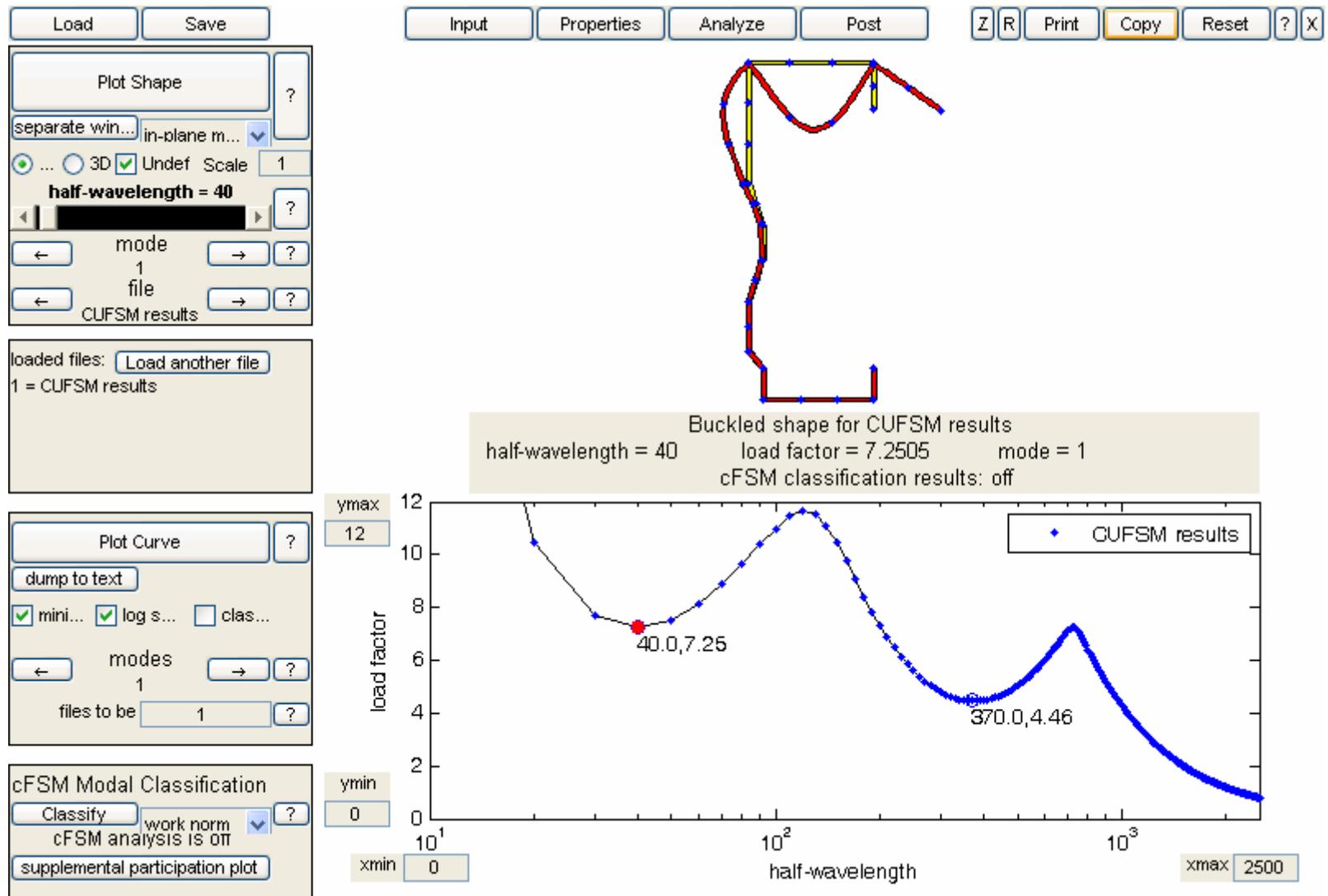
P =	56224.9202	<input type="checkbox"/>
Mxx =	1799181.7684	<input checked="" type="checkbox"/>
Mzz =	458775.7014	<input type="checkbox"/>
M11 =	1801542.4251	<input type="checkbox"/>
M22 =	458729.0437	<input type="checkbox"/>
B =	0	<input type="checkbox"/>

Generate Stress using checked P and M ?

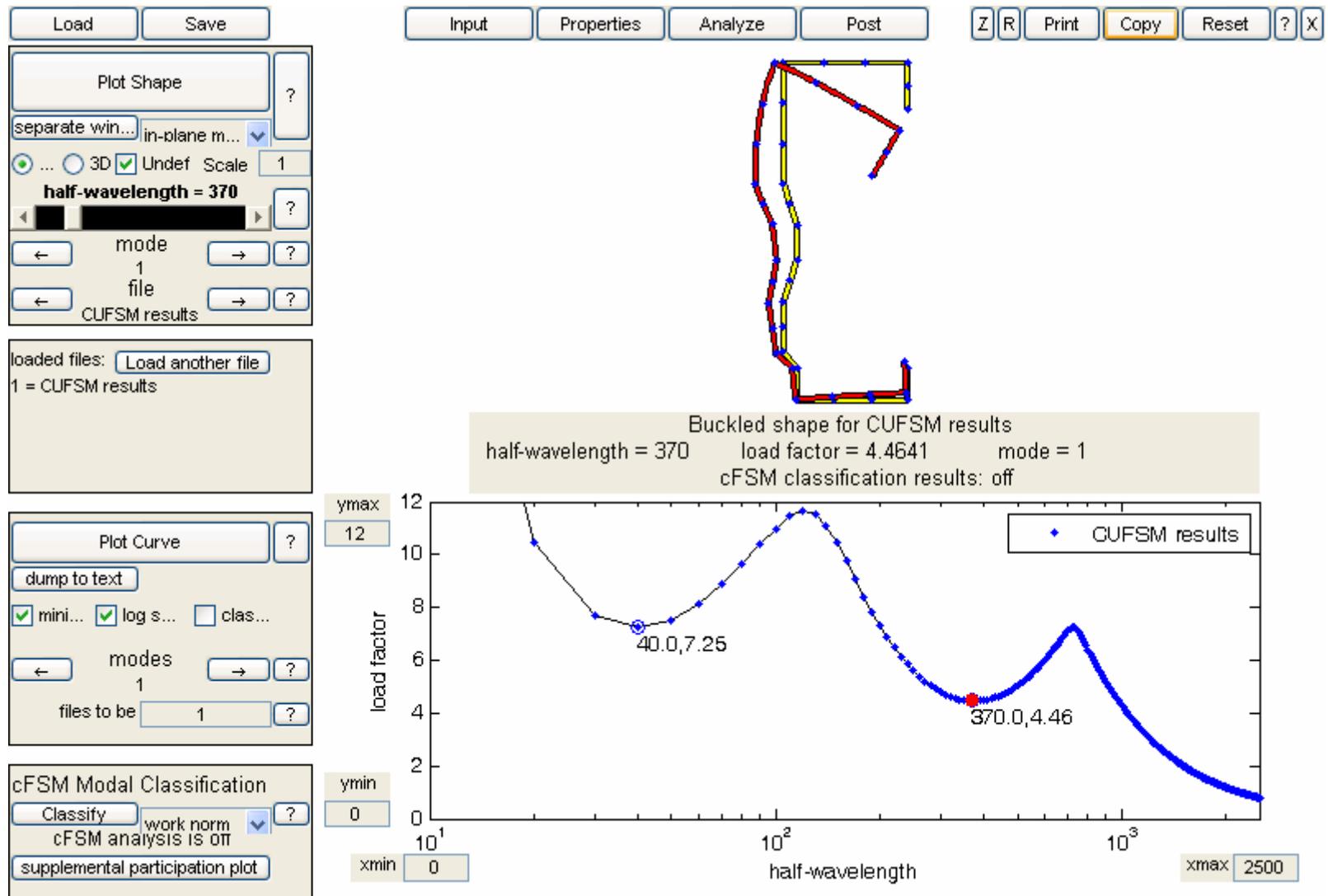


Scale = 1 Max Comp. = 168.9256 Min Tens. = -180

II.1.3 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local. **Correspondente ao momento positivo (meio do vão).**



II.1.4 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo distorcional. **Correspondente ao momento positivo (meio do vão).**



II.1.5 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado. **Correspondente ao momento negativo (engaste).**

Calculated Section Properties

A = 312.3607	J = 234.2705
xcg = 12.915	zcg = 54.6646
xx̄ = 547148.1324	lzz = 67807.5291
xz = 191.349	θ = -0.022872
I1 = 547148.2088	I22 = 67807.4527

Open Section Properties

Xs = -16.4001	Zs = 61.7
Cw = 160775671.3931	774
β1 = -16.3656	Basic Pl... ω scale = 1
β2 = 112.3039	warping text out

Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

Moments consider Unsymmet... Restrained Bending

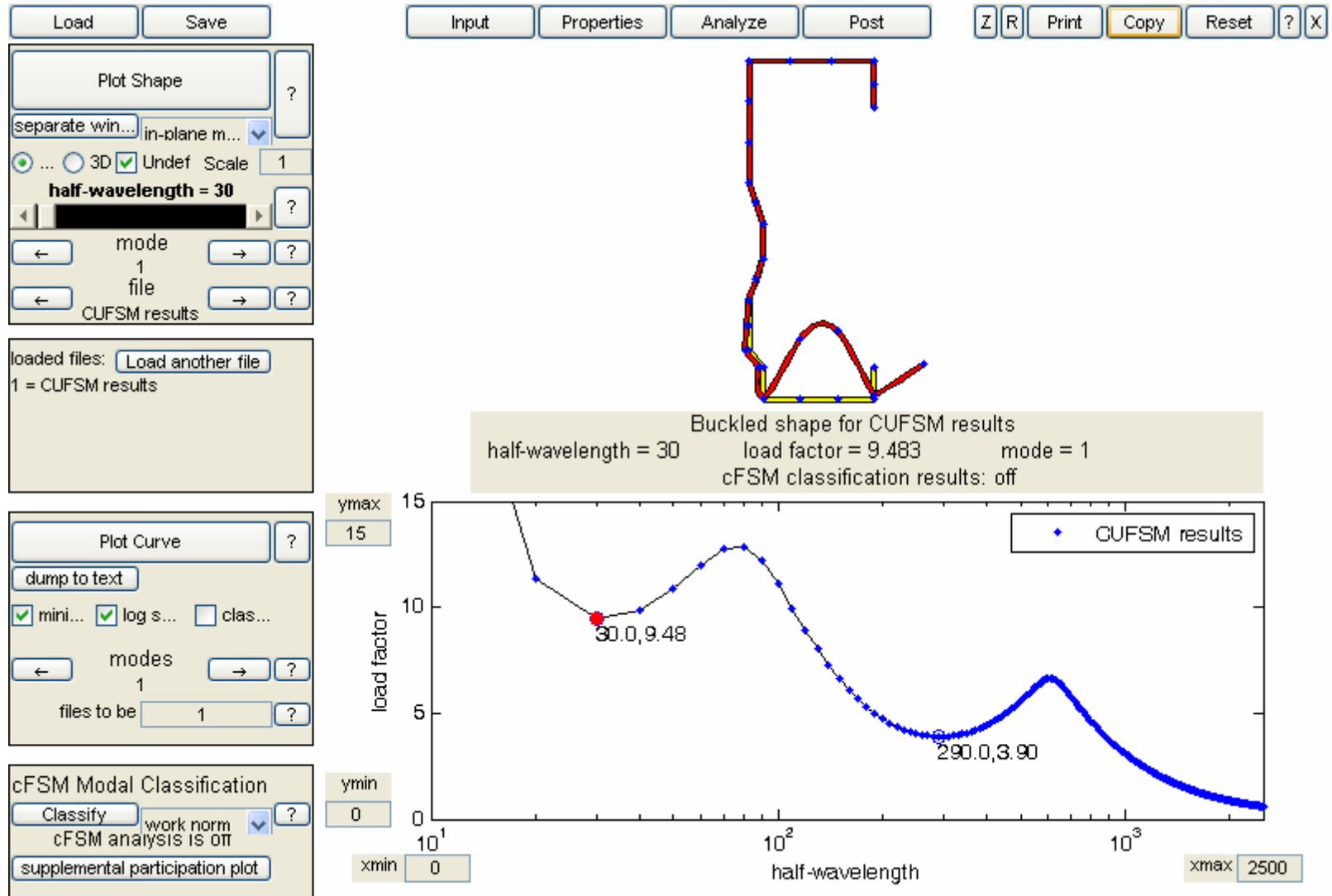
Generate P and M based on max (yield)

Bimoment based on T = - x =

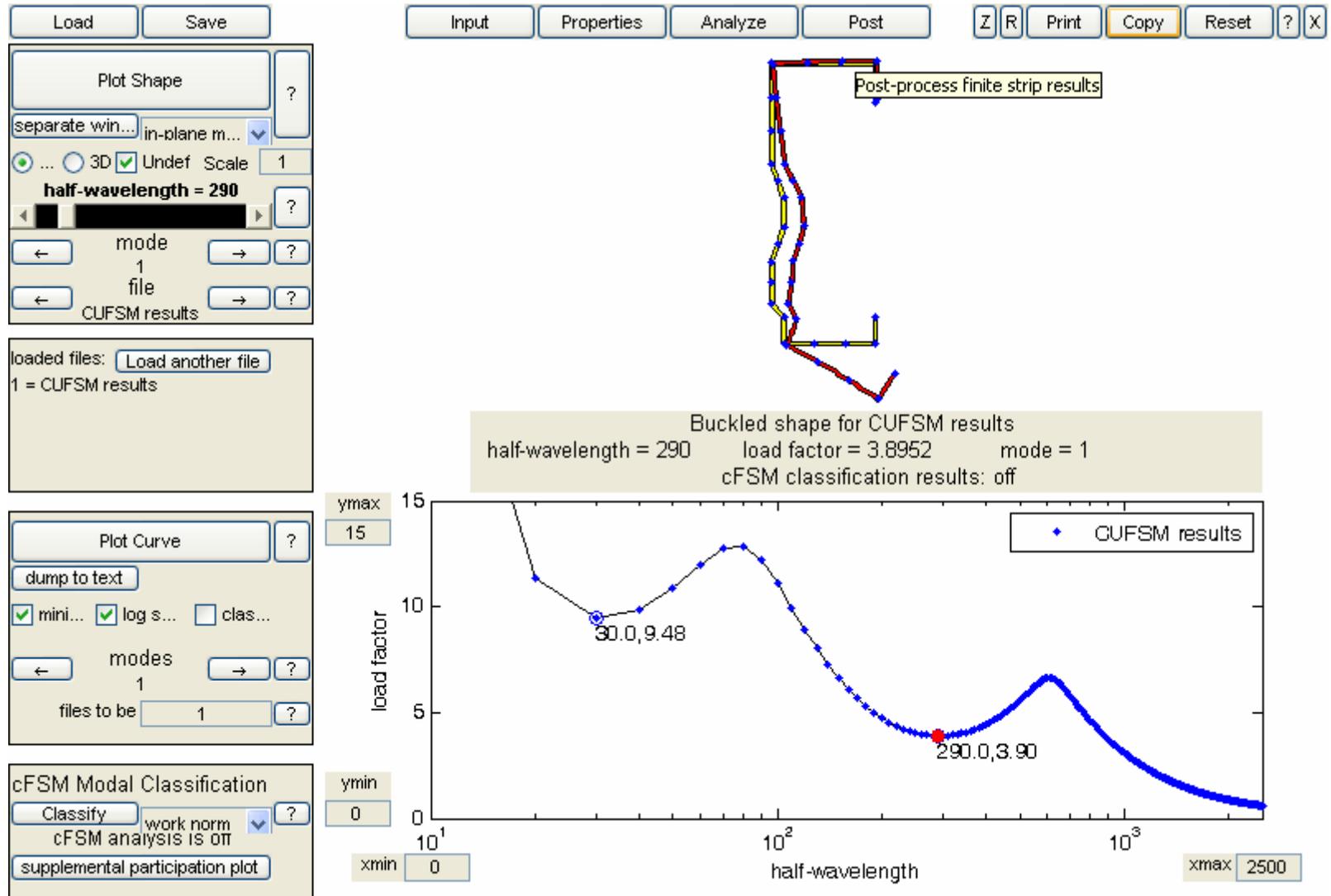
P =	56224.9202	<input type="checkbox"/>
Mxx =	-1799181.7684	<input checked="" type="checkbox"/>
Mzz =	458775.7014	<input type="checkbox"/>
M11 =	1801542.4251	<input type="checkbox"/>
M22 =	458729.0437	<input type="checkbox"/>
B =	0	<input type="checkbox"/>

Scale =
Max Comp. = 180
Min Tens. = -168.9256

II.1.6 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local. **Correspondente ao momento negativo (engaste).**



II.1.7 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo distorcional. **Correspondente ao momento negativo (engaste).**



II.2 - Longarina fechada – EL 115 O 1,50 mm.

II.2.1 - Entrada do tipo do material, coordenadas dos nós e espessura.

Load Save Input Properties Analyze Post Z R Print Copy Reset ? X

Material Properties

mat# | Ex | Ey | vx | vy | Gxy

100	205000.00	205000.00	0.30	0.30	78000.00
-----	-----------	-----------	------	------	----------

Nodes

node# | x | z | xdof | zdof | ydof | qdof | stress

1	39.00	0.00	1	1	1	1	-173.73
2	26.13	0.00	1	1	1	1	-175.52
3	13.07	0.00	1	1	1	1	-177.33
4	0.00	0.00	1	1	1	1	-179.14
5	0.00	7.50	1	1	1	1	-156.75
6	0.00	15.00	1	1	1	1	-134.36
7	37.50	16.50	1	1	1	1	-124.69
8	37.50	9.00	1	1	1	1	-147.07

Elements

elem# | nodei | nodej | thickness | mat#

1	1	2	1.500000	100
2	2	3	1.500000	100
3	3	4	1.500000	100
4	4	5	1.500000	100
5	5	6	1.500000	100
6	6	7	0.000000	100
7	7	8	1.500000	100

Update Plot

Plot Options:

- node #
- elemen...
- materia...
- stress ...
- stress ...
- coordin...
- constr...
- springs
- origin

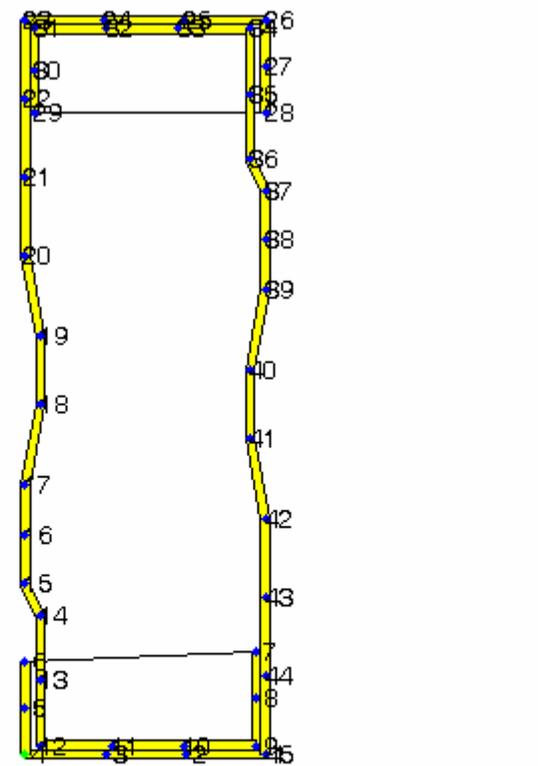
C/Z Template

Double Elem.

Divide Elem.

Delete Elem.

Trans. Node



Length: 2320.0 2330.0 2340.0 2350.0 2360.0 2370.0 2380.0 2390.0 2400.0 2410.0 2420.0 2430.0 2440.0 2450.0 2460.0 2470.0 2480.0 2490.0 2500.0

Springs

node# | DOF(x=1,z=2,y=3,theta=4) | kspring | kflag

0			
---	--	--	--

General Constraints

Master-Sla... ?

node#e | DOFe | coeff. | node#k | DOFk

0			
---	--	--	--

cFSM

Basis for cFSM

- Natural modes
- Axial m...

On/Off

- Global 0
- Dist. 0
- Local 0
- Other 0

II.2.2 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado.

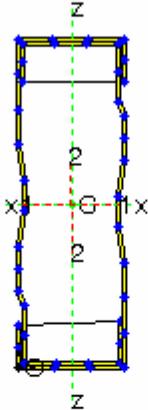
Load Save Input Properties Analyze Post Z R Print Copy Reset ? X

Calculated Section Properties

A = 663.9497	J = 497.9623
xcg 19.561	zcg = 59.1026
xx̄ = 1395391.1256	lzz = 177969.654
xz = -8260.9859	θ = 0.38876
I1 = 1395447.1791	I22 = 177913.6005

Open Section Properties

Xs = -14.8536	Zs = 160.5943
Cw 2946598637.7593	
β1 = -203.1393	Basic Pl... ω scale 1
β2 = 67.2961	warping text out



Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

Moments consider Unsymmet... Restrained Bending

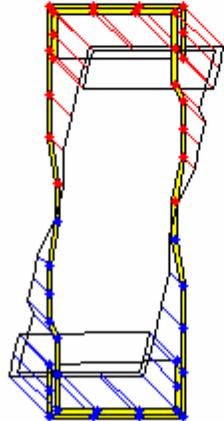
Generate P and M based on max (yield) stress = 180

Bimoment based on T = 0 - = 100 x = 50

Calculate P, M and B ? !

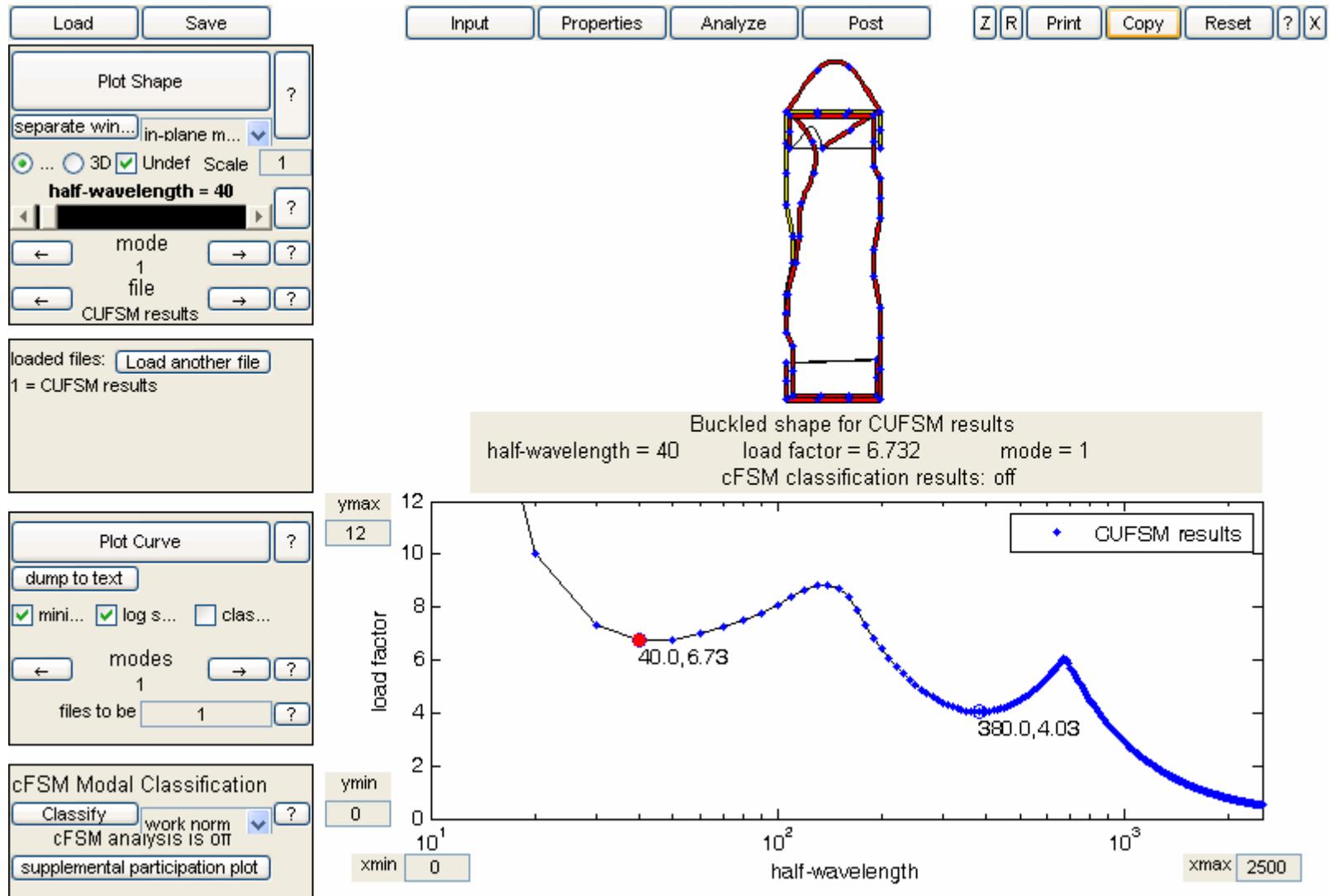
P =	119510.9502	<input type="checkbox"/>
Mxx =	4164220.5143	<input checked="" type="checkbox"/>
Mzz =	1608452.5949	<input type="checkbox"/>
M11 =	4219480.5833	<input type="checkbox"/>
M22 =	1604305.1097	<input type="checkbox"/>
B =	0	<input type="checkbox"/>

Generate Stress using checked P and M ?



Scale = 1 Max Comp. = 180 Min Tens. = -179.1368

II.2.3 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local.



ANEXO III - Análise dos montantes no programa CUFSM v2.6

III.1 - Montante – EM 80 - 2,00 mm.

III.1.1 - Entrada do tipo do material, coordenadas dos nós e espessura.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Material Properties ?

mat# | Ex | Ey | vx | vy | Gxy

100 205000.00 205000.00 0.30 0.30 78000.00

Nodes ?

node# | x | z | xdof | zdof | ydof | qdof | stress

1 57.00 4.00 1 1 1 180.00
 2 57.00 14.00 1 1 1 180.00
 3 37.00 14.00 1 1 1 180.00
 4 30.00 0.00 1 1 1 180.00
 5 15.00 0.00 1 1 1 180.00
 6 0.00 0.00 1 1 1 180.00
 7 0.00 11.39 1 1 1 180.00
 8 0.00 22.95 1 1 1 180.00
 9 0.00 34.50 1 1 1 180.00

Elements ?

elem# | nodei | nodej | thickness | mat#

1 1 2 2.000000 100
 2 2 3 2.000000 100
 3 3 4 2.000000 100
 4 4 5 2.000000 100
 5 5 6 2.000000 100
 6 6 7 2.000000 100
 7 7 8 2.000000 100
 8 8 9 2.000000 100

Lengths ?

100.0 110.0 120.0 130.0 140.0 150.0 160.0 170.0 180.0 190.0 200.0 210.0 220.0 230.0 240.0 250.0 260.0 270.0 280.0 290.0 300.0 310.0 320.0 330.0 340.0 350.0

Springs ?

node# | DOF(x=1,z=2,y=3,theta=4) | k.spring | kflag

0

C/Z template

Double All

Divide One

Delete One

Translate

Update Plot

Plot Options:

node #

element #

material #

stress ma

stress dist

coordinat

constraint

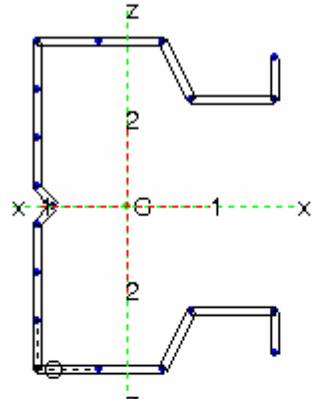
springs

origin

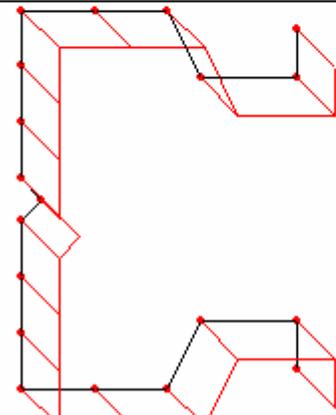
III.1.2 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Calculated Section Properties

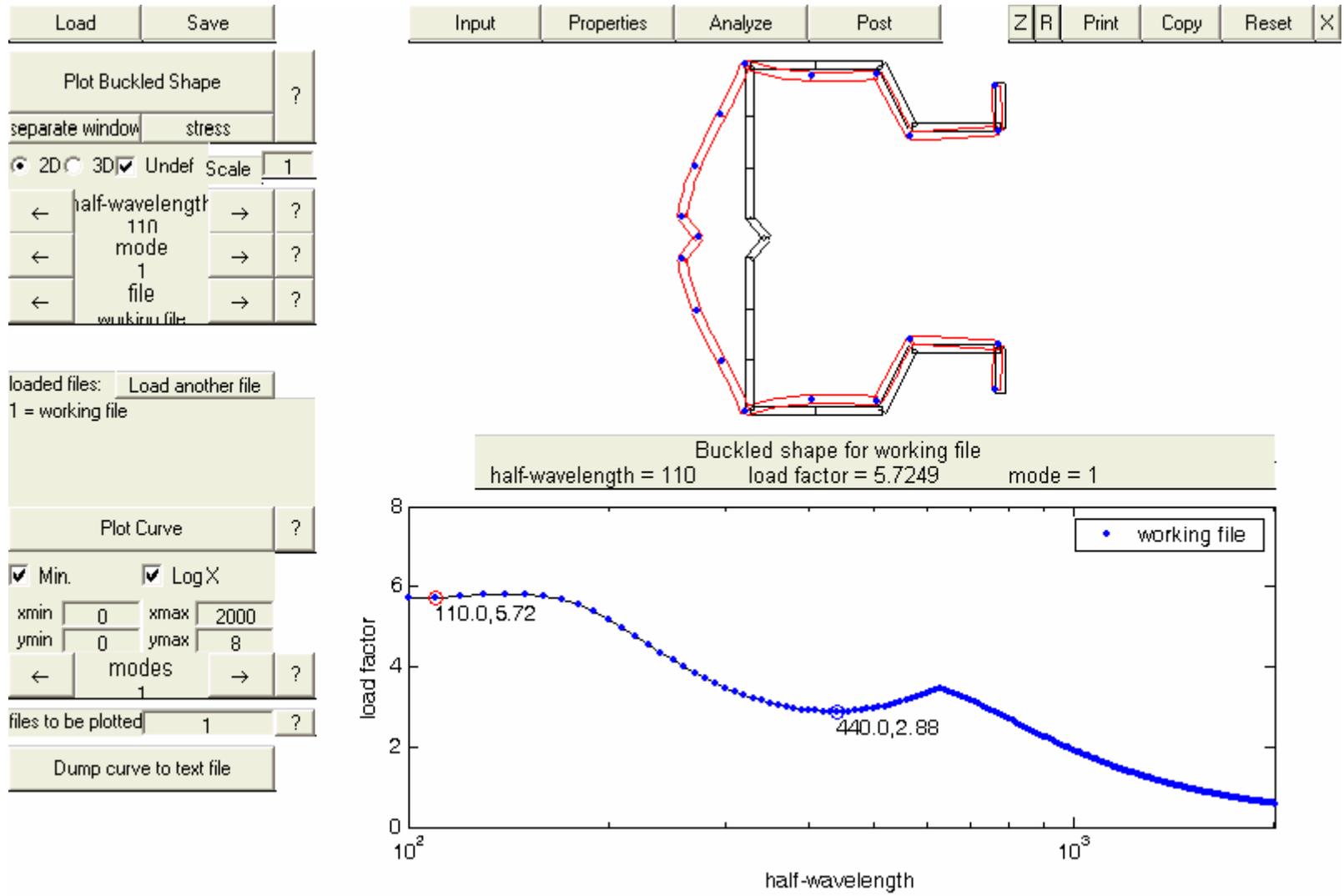
<p>A = 464.6931</p> <p>xcg21.4886 zcg = 39</p> <p>$I_{xx} = 413195.9483$ $I_{zz} = 201498.8467$</p> <p>$I_{xz} = 5.8208e-011$ $\theta = -1.5754e-014$</p> <p>$I_{11} = 413195.9483$ $I_{22} = 201498.8467$</p> <p>$C_w = 359127543.3238$ J = 619.5908</p> <p>$X_s = -29.5156$ $\beta_x = 2.3605e-014$</p> <p>$Z_s = 39$ $\beta_z = 112.508$</p> <p>$\beta_1 = 2.3605e-014$ Basic Plot <input type="button" value="ω scale = 1"/></p> <p>$\beta_2 = 112.508$ <input type="button" value="warping text out"/></p>	
---	---

Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

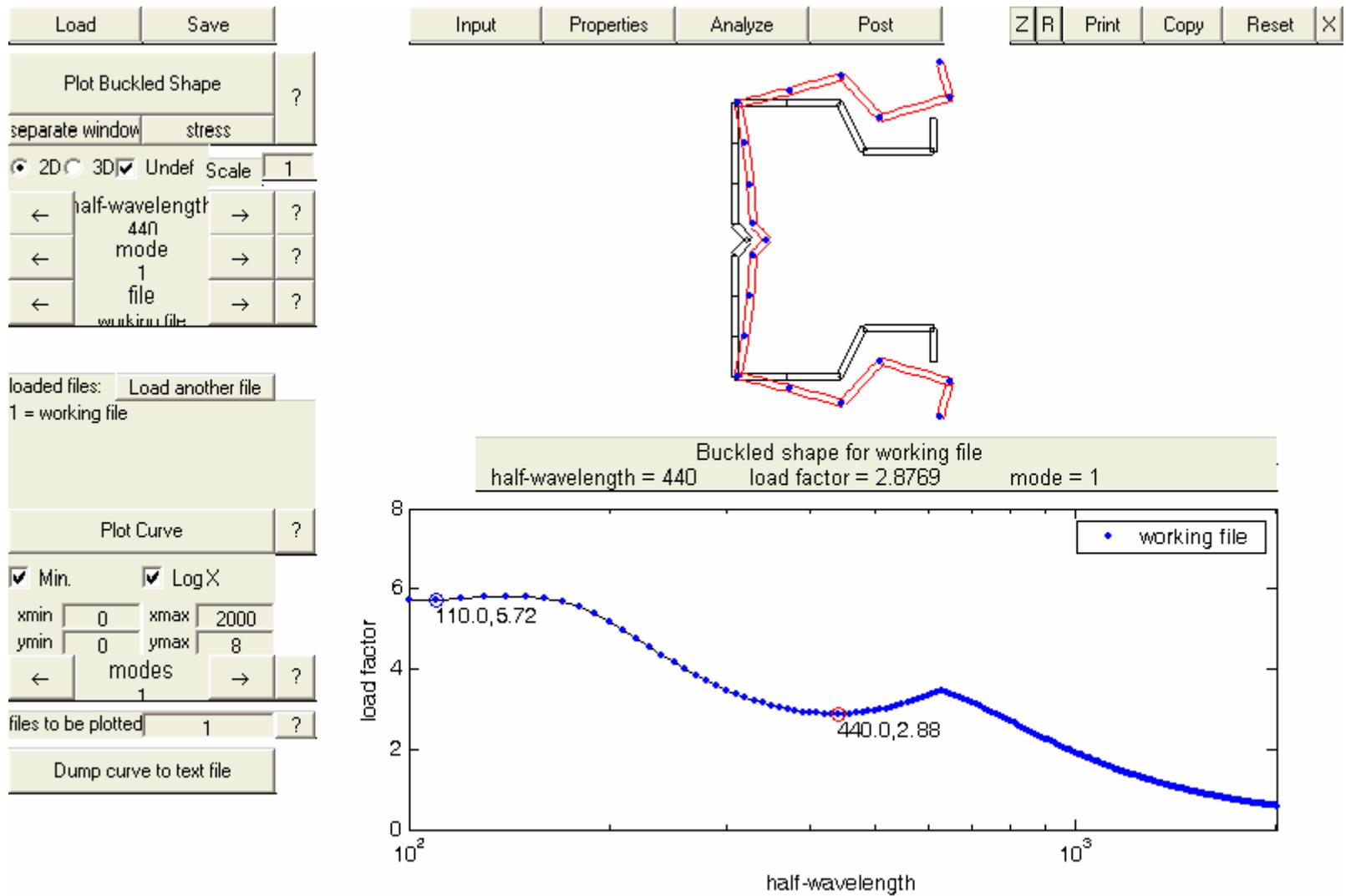
<p>Moments consider: <input checked="" type="radio"/> Unsymmetric <input type="radio"/> Restrained Bending</p> <p>Generate P and M based on max (yield) <input type="text" value="180"/></p> <p>Bimoment based on T = <input type="text" value="0"/> L = <input type="text" value="100"/> x = <input type="text" value="50"/></p> <p><input type="button" value="Calculate P, M and B"/> ?</p> <p>P = <input type="text" value="83644.7567"/> <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Mxx = <input type="text" value="1907058.2228"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Mzz = <input type="text" value="1021355.9464"/> <input type="checkbox"/></p> <p>M11 = <input type="text" value="1907058.2228"/> <input type="checkbox"/></p> <p>M22 = <input type="text" value="1021355.9464"/> <input type="checkbox"/></p> <p>B = <input type="text" value="0"/> <input type="checkbox"/></p> <p><input type="button" value="Generate Stress using checked P and M"/> ?</p>	
--	--

Scale = Max Comp. = 180 Min Tens. = 0

III.1.3 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local.



III.1.4 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo distorcional.



III.2 - Montante – EM 80 - 2,65 mm.

III.2.1 - Entrada do tipo do material, coordenadas dos nós e espessura.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Material Properties ? mat# Ex Ey vx vy Gxy 100 205000.00 205000.00 0.30 0.30 78000.00		C/Z template Double All Divide One Delete One Translate Update Plot Plot Options: <input checked="" type="checkbox"/> node # <input type="checkbox"/> element # <input type="checkbox"/> material # <input type="checkbox"/> stress ma: <input type="checkbox"/> stress dist <input type="checkbox"/> coordinab: <input checked="" type="checkbox"/> constraint <input checked="" type="checkbox"/> springs <input checked="" type="checkbox"/> origin	
Nodes ? node# x z xdof zdof ydof qdof stress 1 57.00 4.65 1 1 1 1 200.00 2 57.00 14.32 1 1 1 1 200.00 3 36.67 14.32 1 1 1 1 200.00 4 29.68 0.00 1 1 1 1 200.00 5 14.84 0.00 1 1 1 1 200.00 6 0.00 0.00 1 1 1 1 200.00 7 0.00 11.49 1 1 1 1 200.00 8 0.00 23.16 1 1 1 1 200.00 9 0.00 34.83 1 1 1 1 200.00			
Elements ? elem# nodei nodej thickness mat# 1 1 2 2.650000 100 2 2 3 2.650000 100 3 3 4 2.650000 100 4 4 5 2.650000 100 5 5 6 2.650000 100 6 6 7 2.650000 100 7 7 8 2.650000 100 8 8 9 2.650000 100			

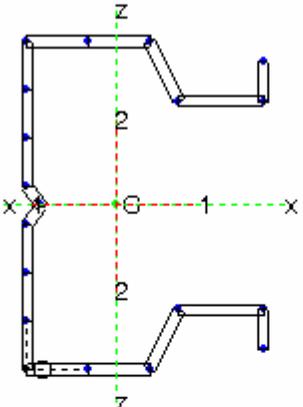
Lengths ? 50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0 110.0 120.0 130.0 140.0 150.0 160.0 170.0 180.0 190.0 200.0 210.0 220.0 230.0 240.0 250.0 260.0 270.0 280.0 290.0 300.0 310.0

Springs ? node# DOF(x=1,z=2,y=3,theta=4) kspring kflag 0	Constraints ? Master-Slave Constraint node#e DOFe coeff. node#k DOFk 0
--	---

III.2.2 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Calculated Section Properties

<p>A = 615.0649</p> <p>xcg21.3859 zcg = 39.325</p> <p>lxx =553137.0455 lzz = 265054.1936</p> <p>lxz =-0.38007 $\theta = 7.5591e-005$</p> <p>I11 =553137.0455 I22 = 265054.1936</p> <p>Cw =486288946.229 J = 1439.7644</p> <p>Xs = -29.4864 $\beta_x = -0.00013656$</p> <p>Zs = 39.325 $\beta_z = 111.8795$</p> <p>$\beta_1 = -0.00014297$</p> <p>$\beta_2 = 111.8795$</p>	
---	---

Basic Plot ω scale = 1
warping text out

Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

Moments consider: Unsymmetric Restrained Bending

Generate P and M based on max (yield)

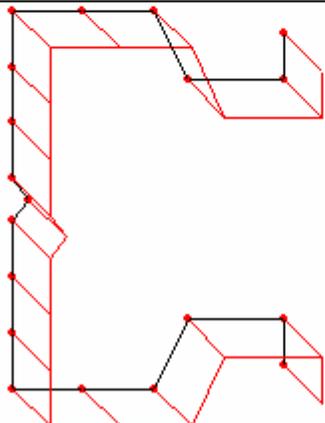
Bimoment based on T = L = x =

Calculate P, M and B ?

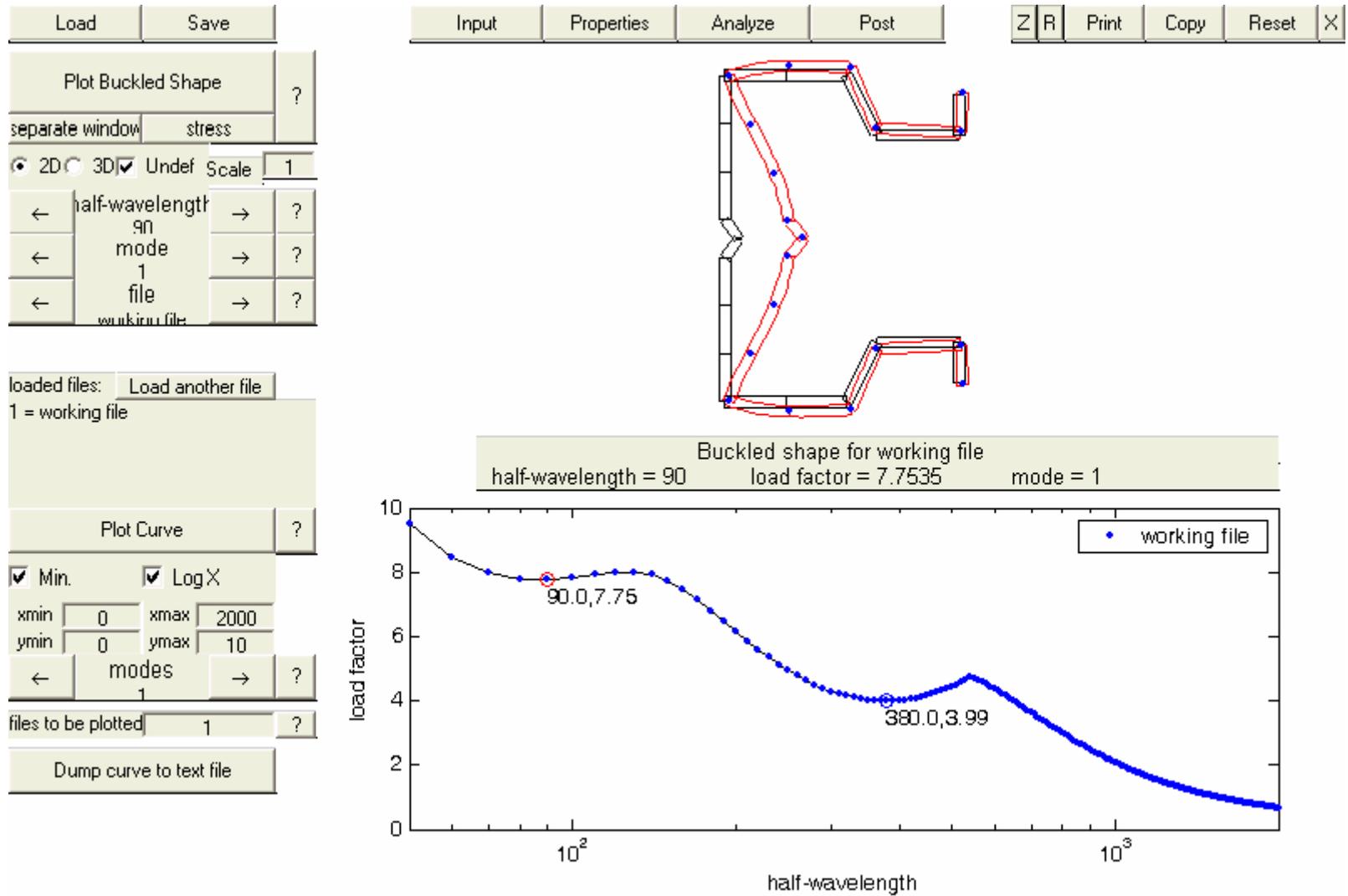
P =	110711.6824	<input checked="" type="checkbox"/>
Mxx =	2531836.4772	<input type="checkbox"/>
Mzz =	1339630.8499	<input type="checkbox"/>
M11 =	2531836.6351	<input type="checkbox"/>
M22 =	1339630.0253	<input type="checkbox"/>
B =	0	<input type="checkbox"/>

Generate Stress using checked P and M ?

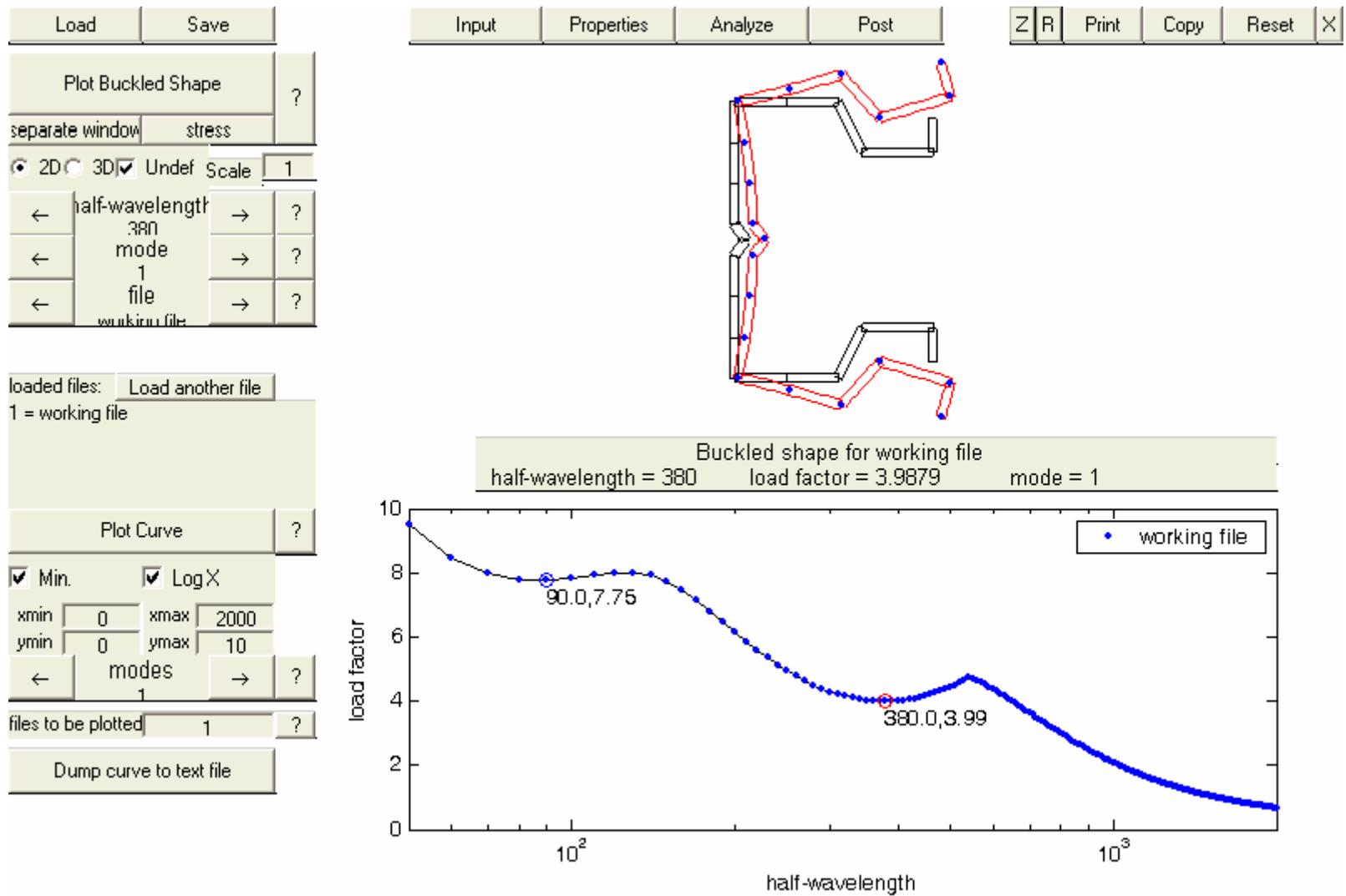
Scale = Max Comp. = 180 Min Tens. = 0



III.2.3 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local.



III.2.4 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo distorcional.



III.3 - Montante – EM 100 - 2,00 mm.

III.3.1 - Entrada do tipo do material, coordenadas dos nós e espessura.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Material Properties

mat# | Ex | Ey | vx | vy | Gxy

100	205000.00	205000.00	0.30	0.30	78000.00
-----	-----------	-----------	------	------	----------

Nodes

node# | x | z | xdof | zdof | ydof | qdof | stress

1	77.00	0.50	1	1	1	1	200.00
2	77.00	13.50	1	1	1	1	200.00
3	57.00	13.50	1	1	1	1	200.00
4	39.00	0.00	1	1	1	1	200.00
5	19.50	0.00	1	1	1	1	200.00
6	0.00	0.00	1	1	1	1	200.00
7	0.00	14.52	1	1	1	1	200.00
8	0.00	29.26	1	1	1	1	200.00
9	0.00	44.00	1	1	1	1	200.00

Elements

elem# | nodei | nodej | thickness | mat#

1	1	2	2.000000	100
2	2	3	2.000000	100
3	3	4	2.000000	100
4	4	5	2.000000	100
5	5	6	2.000000	100
6	6	7	2.000000	100
7	7	8	2.000000	100
8	8	9	2.000000	100

Lengths

50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0 110.0 120.0 130.0 140.0 150.0 160.0 170.0 180.0 190.0 200.0 210.0 220.0 230.0 240.0 250.0 260.0 270.0 280.0 290.0 300.0 310.0

Springs

node# | DOF(x=1,z=2,y=3,theta=4) | kspring | kflag

0

C/Z template

Double All

Divide One

Delete One

Translate

Update Plot

Plot Options:

node #

element #

material #

stress ma

stress dist

coordinab

constraint

springs

origin

Constraints

node#e | DOFe | coeff. | node#k | DOFk

0

III.3.2 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Calculated Section Properties

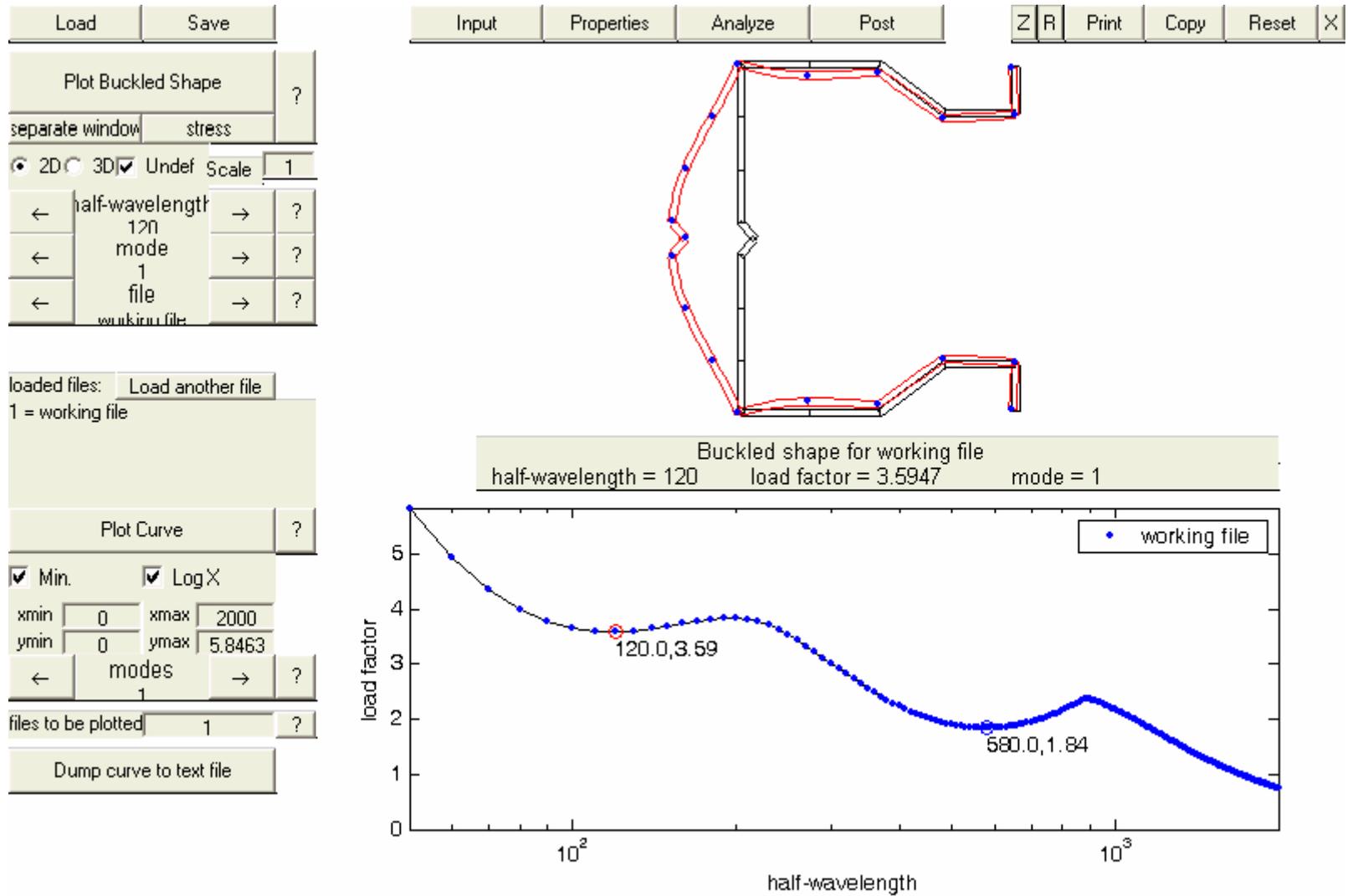
<p>A = 578.0832</p> <p>xcg29.0169 zcg = 48.5</p> <p>lxx = 865737.4715 lzz = 472462.5424</p> <p>lxz = -1.1642e-010 $\theta = 1.696e-014$</p> <p>I11 = 865737.4715 I22 = 472462.5424</p> <p>Cw = 1137336399.0011 J = 770.7776</p> <p>Xs = -39.328 $\beta_x = -1.0062e-013$</p> <p>Zs = 48.5 $\beta_z = 155.1275$</p> <p>$\beta_1 = -1.017e-013$ Basic Plot <input type="button" value="ω scale = 1"/> <input type="button" value="warping text out"/></p> <p>$\beta_2 = 155.1275$</p>	
--	--

Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

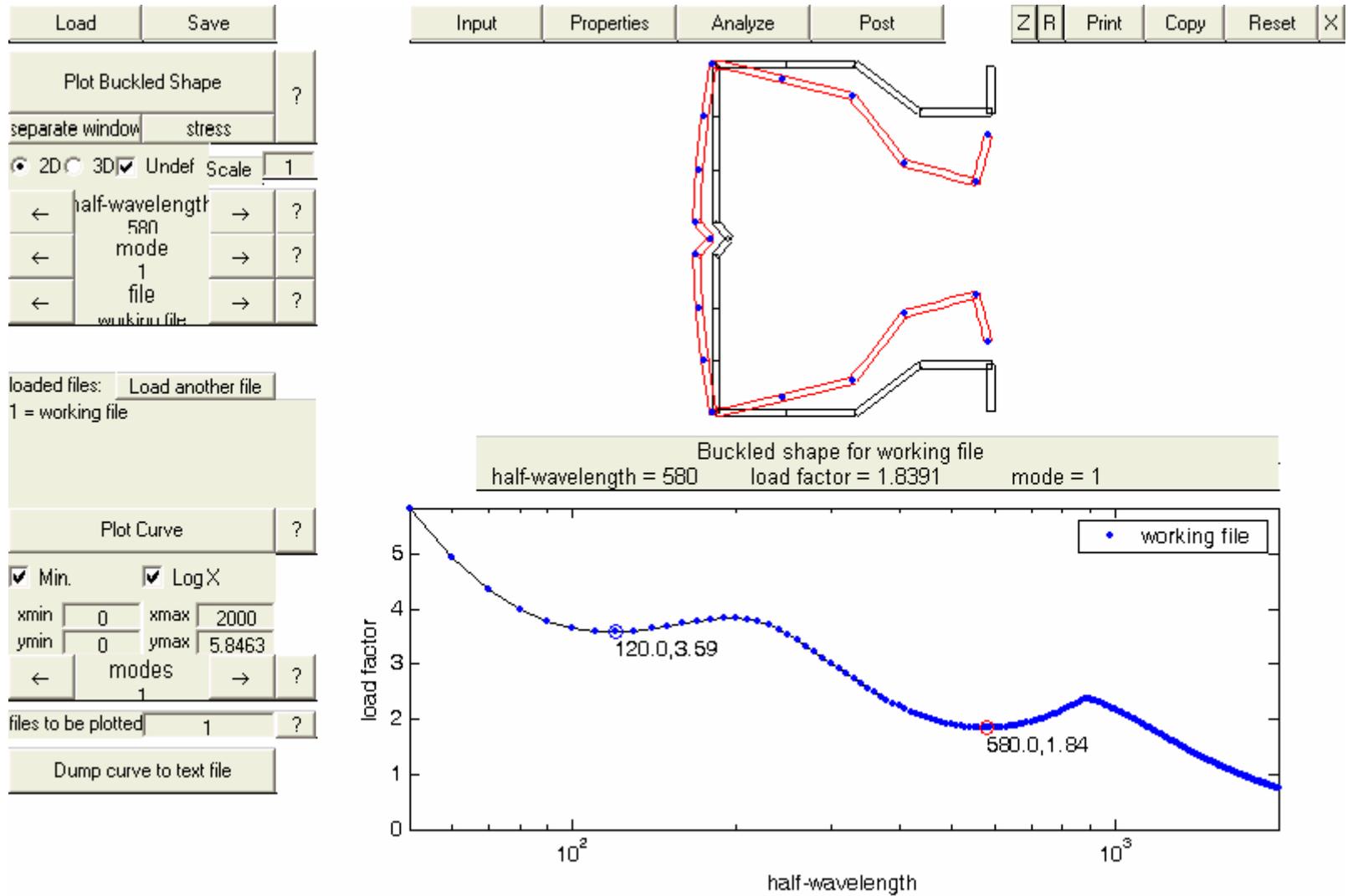
<p>Moments consider: <input checked="" type="radio"/> Unsymmetric <input type="radio"/> Restrained Bending</p> <p>Generate P and M based on max (yield) <input type="text" value="180"/></p> <p>Bimoment based on T = <input type="text" value="0"/> L = <input type="text" value="100"/> x = <input type="text" value="50"/></p> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="Calculate P, M and B"/> <input type="button" value="?"/></p> <p>P = <input type="text" value="104054.974"/> <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Mxx = <input type="text" value="3213046.2859"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Mzz = <input type="text" value="1772357.5478"/> <input type="checkbox"/></p> <p>M11 = <input type="text" value="3213046.2859"/> <input type="checkbox"/></p> <p>M22 = <input type="text" value="1772357.5478"/> <input type="checkbox"/></p> <p>B = <input type="text" value="0"/> <input type="checkbox"/></p> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="Generate Stress using checked P and M"/> <input type="button" value="?"/></p>	
--	--

Scale = Max Comp. = 180 Min Tens. = 0

III.3.3 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local.



III.3.4 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo distorcional.



III.4 - Montante – EM 100 - 2,65 mm

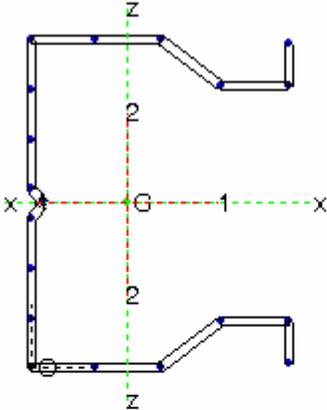
III.4.1 - Entrada do tipo do material, coordenadas dos nós e espessura

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
Material Properties ? <small>mat# Ex Ey vx vy Gxy</small> <input style="width: 100%;" type="text" value="100 205000.00 205000.00 0.30 0.30 78000.00"/>		<small>C/Z template</small> <input type="button" value="Double All"/> <input type="button" value="Divide One"/> <input type="button" value="Delete One"/> <input type="button" value="Translate"/> <input type="button" value="Update Plot"/>									
Nodes ? <small>node# x z xdof zdof ydof qdof stress</small> <input style="width: 100%;" type="text" value="1 77.00 1.15 1 1 1 1 200.00
2 77.00 13.82 1 1 1 1 200.00
3 56.67 13.82 1 1 1 1 200.00
4 38.67 0.00 1 1 1 1 200.00
5 19.34 0.00 1 1 1 1 200.00
6 0.00 0.00 1 1 1 1 200.00
7 0.00 14.63 1 1 1 1 200.00
8 0.00 29.48 1 1 1 1 200.00
9 0.00 44.33 1 1 1 1 200.00"/>		<small>Plot Options:</small> <input checked="" type="checkbox"/> node # <input type="checkbox"/> element # <input type="checkbox"/> material # <input type="checkbox"/> stress ma: <input type="checkbox"/> stress dist <input type="checkbox"/> coordinab: <input checked="" type="checkbox"/> constraint <input checked="" type="checkbox"/> springs <input checked="" type="checkbox"/> origin									
Elements ? <small>elem# nodei nodej thickness mat#</small> <input style="width: 100%;" type="text" value="1 1 2 2.650000 100
2 2 3 2.650000 100
3 3 4 2.650000 100
4 4 5 2.650000 100
5 5 6 2.650000 100
6 6 7 2.650000 100
7 7 8 2.650000 100
8 8 9 2.650000 100"/>											
Lengths ? <input style="width: 100%;" type="text" value="50.0 60.0 70.0 80.0 90.0 100.0 110.0 120.0 130.0 140.0 150.0 160.0 170.0 180.0 190.0 200.0 210.0 220.0 230.0 240.0 250.0 260.0 270.0 280.0 290.0 300.0 310.0"/>											
Springs ? <small>node# DOF(x=1,z=2,y=3,theta=4) kspring kflag</small> <input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>						Constraints Master-Slave Constraint ? <small>node#e DOFs coeff. node#k DOFk</small> <input style="width: 100%;" type="text" value="0"/>					

III.4.2 - Cálculo das propriedades da seção e do momento a ser aplicado.

Load	Save	Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
------	------	-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---

Calculated Section Properties

<p>A = 764.7819</p> <p>xcg = 28.9208 zcg = 48.825</p> <p>lxx = 1155390.7591 lzz = 622532.0653</p> <p>lxz = -0.60172 $\theta = 6.47e-005$</p> <p>I11 = 1155390.7591 I22 = 622532.0653</p> <p>Cw = 1538668935.7934 J = 1790.2271</p> <p>Xs = -39.3208 $\beta_x = -3.1534e-005$</p> <p>Zs = 48.825 $\beta_z = 154.5703$</p> <p>$\beta_1 = -4.2538e-005$</p> <p>$\beta_2 = 154.5703$</p>	
--	---

Basic Plot ω scale = 1
warping text out

Calculation of Loads and Moments for Generation of Stress on Member

Moments consider: Unsymmetric Restrained Bending

Generate P and M based on max (yield)

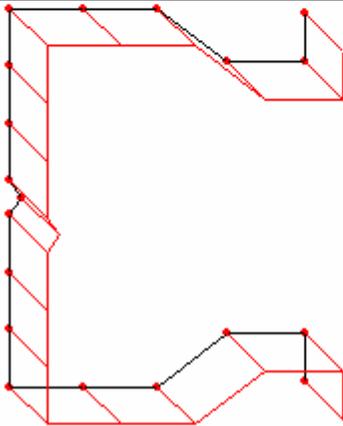
Bimoment based on T = L = x =

Calculate P, M and B ?

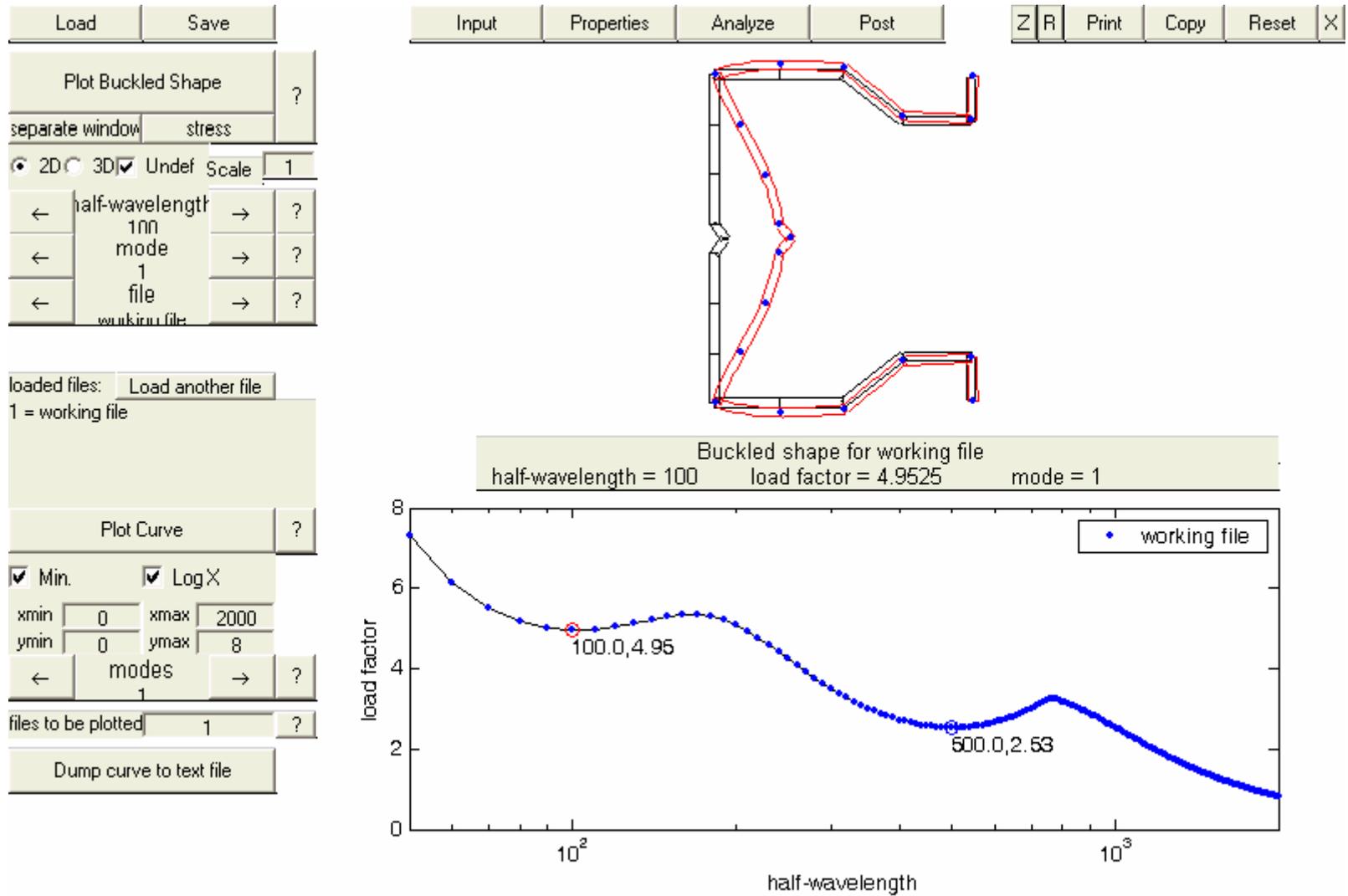
P =	137660.7496	<input checked="" type="checkbox"/>
Mxx =	4259499.3085	<input type="checkbox"/>
Mzz =	2330647.0632	<input type="checkbox"/>
M11 =	4259498.8981	<input type="checkbox"/>
M22 =	2330645.6571	<input type="checkbox"/>
B =	0	<input type="checkbox"/>

Generate Stress using checked P and M ?

Scale = Max Comp. = 180 Min Tens. = 0



III.4.3 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo local.



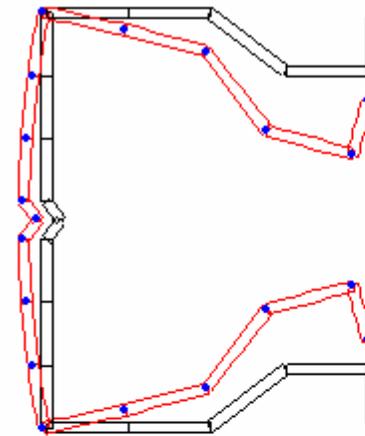
III.4.4 - Comprimento da semi-onda e fator de carga correspondente ao modo distorcional.

Load	Save
Plot Buckled Shape	
separate window	stress
<input checked="" type="radio"/> 2D <input type="radio"/> 3D <input checked="" type="checkbox"/> Undef	Scale 1
← half-wavelength 500 →	?
← mode 1 →	?
← file working file →	?

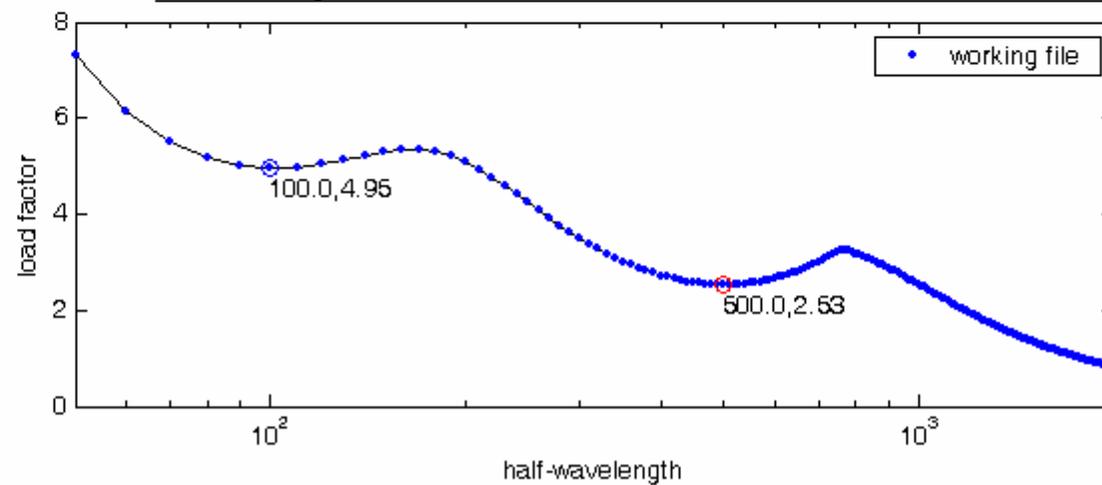
loaded files: Load another file
1 = working file

Plot Curve	
<input checked="" type="checkbox"/> Min.	<input checked="" type="checkbox"/> Log X
xmin 0	xmax 2000
ymin 0	ymax 8
← modes 1 →	?
files to be plotted 1	?
Dump curve to text file	

Input	Properties	Analyze	Post	Z	R	Print	Copy	Reset	X
-------	------------	---------	------	---	---	-------	------	-------	---



Buckled shape for working file
half-wavelength = 500 load factor = 2.5302 mode = 1



Referências

- [1]-ABNT, NBR 14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento, 2001.
- [2]-Specification for the design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute - AISI, 2004.
- [3]-Relatório COPPETEC PEC-8865,2007.
- [4]-Curso Básico de Perfis Formados a Frio, CARVALHO, Paulo Roberto M., GRIGOLETTI, Gladimir, TAMAGNA, Alberto, ITURRIOZ, Ignácio, 2º Edição, Porto Alegre, 2006.
- [5]-Programa computacional CUFSM - Finite Strip Method, Cornell University, <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm> (acesso em 10/08/2007).
- [6]-ABNT, NBR 8800 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios - Procedimento, 2003.
- [7]-Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks, Rack Manufacturers Institute - RMI, 1997.